

**DISEÑO DE SISTEMA MECATRONICO DE POSICIONAMIENTO DE  
UNA BALANZA AERODINAMICA PARA UN TUNEL DE VIENTO  
SUBSONICO PARA LA SIMULACION DE AEROMODELOS**

**GUSTAVO ADOLFO ARCE LIBREROS  
JAVIER EDUARDO ENRIQUEZ ORTEGA**

**UNIVESIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y ELECTRONICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2006**

**DISEÑO DE SISTEMA MECATRONICO DE POSICIONAMIENTO DE  
UNA BALANZA AERODINAMICA PARA UN TUNEL DE VIENTO  
SUBSONICO PARA LA SIMULACION DE AEROMODELOS**

**GUSTAVO ADOLFO ARCE LIBREROS  
JAVIER EDUARDO ENRIQUEZ ORTEGA**

**Pasantía para optar al titulo de Ingeniero Mecatrónico**

**Director  
JAIME QUINTERO  
Ingeniero Eléctrico**

**Coordinador  
JULIÁN DE LOS RÍOS  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVESIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMATICA Y ELECTRONICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2006**

### **Nota aceptación**

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecatrónico.

**ING. ANDRES NAVAS**

**Jurado**

**ING. BERNARDO SAVOGAL**

**Jurado**

**Santiago de Cali, 06 de Junio de 2006**

“A mis padres Luís Eduardo y Myriam que son la fuente de inspiración y apoyo que me sirvieron para salir adelante y se que siempre cuento con su infinita incondicionalidad, a mis hermanos Pipo y Luchito, a Gustavo por su gran amistad desde que emprendimos este nuevo rumbo, a Ronald, Esteban y Arnaldo mis grandes amigos del colegio, y como no mencionar a los de la universidad Edwin, Mauricio, Isabel, Edgar; Ángela, Julián y a todos aquellos de una u otra manera han sido parte de este proyecto”.

**JAVIER**

“La vida esta llena de obstáculos que hay que saberlos afrontar y es bueno saber que siempre hay personas que están a tu lado cuando mas lo necesitas familia, amigos, novia todo ser querido o el que este dispuesto a aportar con granito de arena en nuestra formación como seres humanos; quiero dedicar este gran paso que me convierte en un triunfador a mis padres Blanca Nelly Libreros, Nelson Arce a mi hermano Fabián que se han esmerado y sacrificado para que yo pueda salir adelante a mi novia Isabel Espinosa que me supo valorar y esperar, comprender mis angustias en los momentos mas difíciles que viví en el transcurso de la carrera, a mis amigos de la Universidad que me ayudaron y guiaron en épocas difíciles a todos mis profesores que con sus conocimientos contribuyeron a formarme como profesional y vivir esta nueva etapa de mi vida”

**GUSTAVO**

## **AGRADECIMIENTOS.**

A nuestro asesor externo Julián de los Ríos por la confianza que deposito en nosotros desde el principio para llevar a cabo este proyecto, al profesor Jaime Quintero por la grata orientación que nos brindo durante todo este tiempo, a Álvaro José Rojas que sus consejos y ayuda desinteresada nos fue de mucha utilidad y en si, a todo el personal que conforma las áreas de Mecatrónica y Mécanica que sin ser menos importantes contribuyeron con el desarrollo de este proyecto y nuestra formación.

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO CONTEXTUAL	17
1.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA DEL GRUPO DE INVESTIGACION	17
1.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA DE LA EMPRESA	17
1.2.1 Comienzos	17
1.2.2 Misión	18
1.2.3 Visión	18
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	19
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	19
3 OBJETIVOS	20
3.1 Objetivo General	20
3.2 Objetivos Específicos	20
4 JUSTIFICACION	21
5 MARCO TEORICO	22
6 METODOLOGIA	24
7 DESARROLLO DEL PROYECTO	25
7.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE DISEÑO	25
7.2 PLANTEAMIENTO DE LA MISION	26
7.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL CLIENTE	28
7.3.1 Lista de Necesidades del Cliente	28
7.3.2 Especificaciones del producto	31
7.3.3 Benchmarking	32
7.4. GENERACIÓN, SELECCIÓN Y PRUEBA DE CONCEPTOS	36
7.4.1 Generación de conceptos	37
7.4.1.1 Conceptos Generados por Subfunciones	38
7.4.2 Selección de conceptos	43
7.4.3 Prueba de conceptos	45
7.5 ESPECIFICACIONES FINALES DEL DISEÑO	45
7.6 DISEÑO DETALLADO	46
7.6.1 Convertir energía a movimiento rotacional	48
7.6.2 Sensor de posición	50
7.6.3 Sensar fuerzas y momentos	51
7.6.4 Balanza en L	52
7.6.5 Procesamiento y visualización de la información	53

<b>8.</b>	<b>DISEÑO ARQUITECTURAL</b>	<b>54</b>
<b>8.1</b>	Documentación mecánica	54
<b>8.1.1</b>	Planos de partes propias	54
<b>8.1.2</b>	Diseño de Ejes.	54
<b>8.1.3</b>	Funcionalidad y medidas de las partes	69
<b>8.2</b>	Documentación electrónica	64
<b>8.2.1</b>	Tipo de Alimentación	70
<b>8.2.2</b>	Elementos utilizados en los Drivers	70
<b>8.3</b>	Documentación del software	71
<b>8.3.1</b>	Diseño de Controlador para el Motor 1	75
<b>8.3.2</b>	Diseño de Controlador para el Motor 2	79
<b>8.4</b>	Interfaz de Usuario	84
<b>8.5</b>	Lista de Partes	87
<b>9.</b>	<b>PROTOTIPADO</b>	<b>89</b>
<b>9.1</b>	Prototipado Virtual	91
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>92</b>
<b>11.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>94</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>96</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Identificación de las necesidades del cliente	25
<b>Tabla 2.</b> Declaración de las métricas con sus necesidades.	26
<b>Tabla 3.</b> Relación de las métricas con las necesidades.	27
<b>Tabla 4.</b> Benchmarking	30
<b>Tabla 5.</b> Especificaciones Preliminares	31
<b>Tabla 6.</b> Matriz de Tamizaje	37
<b>Tabla 7.</b> Matriz de evaluación de conceptos	38
<b>Tabla 8.</b> Especificaciones técnicas	39
<b>Tabla 9.</b> Tabla de partes	77



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Teorema de Bernoulli	18
<b>Figura 2.</b> Soporte de Bayoneta ó Pértiga-Nasa	19
<b>Figura 3.</b> Modelo IA-63 PAMPA	19
<b>Figura 4.</b> Planeación de productos	22
<b>Figura 5.</b> Soporte de Bayoneta ó Pértiga-Nasa	28
<b>Figura 6.</b> Laboratorio Aerolab	28
<b>Figura 7.</b> Modelo IA-63 PAMPA	29
<b>Figura 8.</b> Caja negra	32
<b>Figura 9.</b> Descomposición Funcional	32
<b>Figura 10.</b> Combinación de Conceptos	34
<b>Figura 11.</b> Concepto 1	34
<b>Figura 12.</b> Concepto 2	35
<b>Figura 13.</b> Concepto 3	35
<b>Figura 14.</b> Concepto 4	36
<b>Figura 15.</b> Concepto 5	36
<b>Figura 16.</b> Embudo de selección de Conceptos	37
<b>Figura 17.</b> Diseño escogido (concepto 4)	39
<b>Figura 18.</b> Diseño secuencial vs. Concurrente	40
<b>Figura 19.</b> Esquema funcional	41
<b>Figura 20.</b> Motorreductor Marca Valeo Serie 402826	41
<b>Figura 21.</b> Curva Característica motor Valeo Serie 402826	42
<b>Figura 22.</b> Motorreductor Marca Valeo Serie 404465	42
<b>Figura 23.</b> Curva Característica motor Valeo Serie 404465	42
<b>Figura 24.</b> Encoder Absoluto	43
<b>Figura 25.</b> Código GRAY	43
<b>Figura 26.</b> Sensor A2 USDigital	44
<b>Figura 27.</b> Dimensiones de las Galgas	44
<b>Figura 28.</b> Balanza tipo L	45
<b>Figura 29.</b> Modulo para toma de datos de las galgas	45
<b>Figura 30.</b> Cubo Balanza	47
<b>Figura 30-1</b> Cubo Balanza Soporte vástago	47
<b>Figura 31.</b> Cubo Soporte Motor 2	48
<b>Figura 32.</b> Cubo Soporte de la Balanza	48
<b>Figura 33.</b> Diagrama de cuerpo Libre Eje 1	49
<b>Figura 34.</b> Diagrama de fuerza cortante y momento flector	50
<b>Figura 35.</b> Diagrama de cuerpo Libre Eje 1 a 45°	51
<b>Figura 36.</b> Diagrama de fuerza cortante y momento flector a 45°	52
<b>Figura 37.</b> Comportamiento del sistema a Flexión	52
<b>Figura 38.</b> Diagrama de Tórque Máximo y Mínimo	54

<b>Figura 39.</b>	Comportamiento del sistema a Torsión	54
<b>Figura 40.</b>	Grafico de fuerzas en X	56
<b>Figura 41.</b>	Análisis tipo Viga	57
<b>Figura 42.</b>	Análisis tipo Columna	58
<b>Figura 43.</b>	Sistema Electromecánico del Motor	61
<b>Figura 44.</b>	Momentos de Inercia	63
<b>Figura 45.</b>	Momentos de Inercia en Jz	64
<b>Figura 46.</b>	Diagrama de bloques de control	65
<b>Figura 47.</b>	Función de Transferencia en lazo abierto del motor 1	65
<b>Figura 48.</b>	Comportamiento en lazo abierto del motor 1.	66
<b>Figura 49.</b>	Función de Transferencia del Motor 1 en Lazo Cerrado	66
<b>Figura 50.</b>	Comportamiento en lazo cerrado del motor 1.	66
<b>Figura 51.</b>	Controlador con un Seguidor Observador para el Motor 1	67
<b>Figura 52.</b>	Planta en Lazo Abierto con Realimentación de Estados	67
<b>Figura 53.</b>	Controlador de la Planta (Seguidor - Observador)	68
<b>Figura 54.</b>	Comportamiento de la señal del motor 1 después de Implementar el (Regulador - Observador)	68
<b>Figura 55.</b>	Comportamiento de la señal del motor 1 después de Implementar el (Seguidor - Observador)	68
<b>Figura 56.</b>	Momentos de Inercia en Jy	69
<b>Figura 57.</b>	Función de Transferencia en lazo Abierto del motor 2.	70
<b>Figura 58.</b>	Comportamiento en lazo abierto del motor 2.	70
<b>Figura 59.</b>	Función de Transferencia en Lazo Cerrado	71
<b>Figura 60.</b>	Comportamiento en lazo cerrado del motor 2.	71
<b>Figura 61.</b>	Diagrama de Bloques del Controlador del Motor2	71
<b>Figura 62.</b>	Planta Lazo Abierto del Motor 2 en Variables de Estado	72
<b>Figura 63.</b>	Controlador Motor 2 (Seguidor - Observador)	72
<b>Figura 64.</b>	Comportamiento de la señal del motor 2 después de Implementar el (Regulador - Observador)	72
<b>Figura 65.</b>	Señal Controlada del motor 2 después de Implementar el (Seguidor-Observador)	73
<b>Figura 66.</b>	Interfaz pagina principal	74
<b>Figura 67.</b>	Muestreo de Fuerzas y Momentos	75
<b>Figura 68.</b>	Graficas para análisis de fuerzas	75
<b>Figura 69.</b>	Vista explosionada	76
<b>Figura 70.</b>	Ubicación de los prototipos.	78
<b>Figura 71.</b>	Renderizado 3D	79

## LISTA DE ANEXOS.

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Data Sheet Motorreductor Marca Valeo serie 402826	84
<b>Anexo B.</b> Data Sheet Motorreductor Marca Valeo serie 404465	85
<b>Anexo C.</b> Data Sheet Sensor de posición Inteligente USDigital A2	86
<b>Anexo D.</b> Especificaciones Técnicas de la Galgas Extensiométricas	86
<b>Anexo E.</b> Esquema Circuitual Driver Puente H	87
<b>Anexo F.</b> Plano Soporte del Eje Principal	88
<b>Anexo G.</b> Plano del Eje Principal	89
<b>Anexo H.</b> Plano del Eje Secundario	90
<b>Anexo I.</b> Plano del Soporte del Motor 2	91
<b>Anexo J.</b> Plano Soporte de la Balanza	92
<b>Anexo K.</b> Plano Cubierta del Sistema	93
<b>Anexo L.</b> Diseño en MATLAB de Controlador para el Motor 1.	94
<b>Anexo M.</b> Diseño en MATLAB de Controlador para el Motor 2.	97

## GLOSARIO

**AEROMODELOS:** Aviones a pequeña escala para diversas pruebas de laboratorio o de entretenimiento.

**AERODINÁMICA:** Efecto que el aire ejerce sobre las partículas u objetos en movimiento.

**CONTROLADOR:** Se suele llamar controlador, al programa necesario para que un cierto programa o sistema operativo sea capaz de utilizar un dispositivo físico como actuadores.

**EJE:** En mecánica, un eje es un elemento de máquina con geometría fundamentalmente axisimétrica, que se emplea como soporte de piezas giratorias pero no transmite ningún esfuerzo de torsión, a diferencia del árbol de transmisión.

**ESFUERZO A FLEXIÓN:** El esfuerzo de flexión es una combinación de los esfuerzos de tracción y compresión. El esfuerzo de flexión deforma los elementos de manera que se comban. Un ejemplo de flexión es una viga apoyada en uno o en los dos extremos y que soporta un peso.

**ESFUERZO A TORSIÓN:** Un cuerpo está sometido a torsión cuando se intentan girar sus extremos en sentidos opuestos. Sus secciones tienden a tomar movimientos de rotación en sentidos opuestos. Si la fuerza es suficiente, también se produce el desgarro o cortadura.

Se encuentran sometidos a torsión todos los ejes que transmiten movimientos de giro.

**ESFUERZO CORTANTE:** Esfuerzo de cizallamiento. Es la suma algebraica de todas las fuerzas verticales situadas a un lado de la sección de un prisma mecánico; en cualquier sección de un prisma mecánico con esfuerzo de cizallamiento existen dos fuerzas paralelas de sentidos contrarios que hacen que “resbalen” las dos partes del prisma.

**FUERZAS DE SUSTENTACIÓN:** Es la fuerza desarrollada por un perfil aerodinámico moviéndose en el aire, ejercida de abajo arriba, y cuya dirección es perpendicular al viento relativo y a la envergadura del avión (no necesariamente perpendiculares al horizonte).

**FUERZA LATERAL:** Si un avión está volando en línea recta y queremos hacerle girar será necesaria la aplicación de alguna fuerza lateral que cambie la trayectoria. Esta fuerza es el componente horizontal de la sustentación.

**FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA:** Se define la *función de transferencia* de un sistema continuo o discreto como la relación en el dominio de la frecuencia compleja entre salida y entrada con condiciones iniciales nulas

**GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS:** UNA galga extensiométrica es un dispositivo electrónico que aprovecha el efecto piezorresistivo para medir deformaciones. Ante una variación en la estructura del material de la galga se producirá una variación de su resistencia eléctrica.

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones de cobre y níquel, platino y silicio.

**GRADO DE LIBERTAD:** Cada uno de los movimientos básicos que definen la movilidad de un determinado robot. Puede indicar un movimiento longitudinal o de rotación.

**MOMENTO DE GUIÑADA:** El momento de guiñada se consigue utilizando la Deriva, el momento de Balance operando los alerones

**MOMENTO FLECTOR:** Es la suma algebraica de los momentos producidos por todas las fuerzas externas a un mismo lado de la sección respecto a un punto de dicha sección.

**POSICIÓN:** Punto del espacio en el que se encuentra un objeto.

**PUENTE H:** Configuración de cuatro mosfet dispuestos de tal manera que permiten invertir el sentido de la corriente para el manejo de motores DC.

**PWM:** Pulse Width Modulation. Modulación de ancho de pulso.

**QFD:** Quality Function Deployment. Despliegue de la función calidad; Se basa en el uso de la descripción sistemática de las relaciones existentes entre todas las exigencias de un producto.

**CONTROL POR REALIMENTACIÓN:** El control por realimentación puede definirse como el uso de las propias variables de estado como medio de controlar el comportamiento del sistema.

**RESOLUCIÓN:** Movimiento más pequeño que el robot puede actuar, sensor y/o controlar; en nuestro caso el movimiento más pequeño de los sensores.

**TÓRQUE:** El producto vectorial de la fuerza aplicada por la distancia se denomina par o momento.

## **RESUMEN**

Este trabajo presenta el proceso de diseño del sistema Mecatrónico de posicionamiento de una balanza aerodinámica para un túnel de viento subsónico para la simulación de aeromodelos, es un producto esencialmente para la construcción de prototipos a escala de partes de aviones, además para el estudio de los estudiantes de ingenierías en la Escuela Militar de Aviación.

El diseño de este sistema consta principalmente del posicionamiento de aeromodelos en 2 grados de libertad (ángulos de ataque y cabeceo), esto con el fin de simular la resistencia de los materiales a diferentes presiones y velocidades del viento.

Este informe está documentado con todas las especificaciones técnicas posibles de manera sencilla, tanto estrategias de diseño como partes propias y conocidas, para la futura construcción de este dispositivo.

## INTRODUCCIÓN

Nuestro mundo esta en continuo cambio tecnológico en diferentes campos, sobre todo en la industria militar, ya que este invita a todo tipo de investigaciones.

Este trabajo de investigación se realiza con el fin de comprender el efecto que el aire ejerce sobre las partículas u objetos en movimiento, lo que se conoce como aerodinámica y la importancia del estudio de esta en la actualidad para entender y mejorar el desempeño tanto de vehículos de velocidad, como de aviones, ya sean de carga o transporte de pasajeros.

En este proyecto se llevara a cabo el diseño de un control de posición con dos grados de libertad para simular diferentes posiciones y las fuerzas y momentos aerodinámicos que interactúan en aeromodelos; los cuales serán interpretados para analizar modelos a escala real.

Aplicando los conocimientos adquiridos durante la carrera y a la necesidad planteada por el centro de investigación de la fuerza aérea CITA, se llevara a cabo el respectivo diseño tanto mecánico, como electrónico con su respectiva fase de control.



## **1. MARCO CONTEXTUAL**

### **1.1 UBICACIÓN GEOGRAFICA DEL CENTRO DE INVESTIGACION**

El centro de investigación CITA ubicado en la escuela militar de aviación (EMAVI), el cual se dedica a la investigación de tecnologías para la construcción de aviones colombianos.

### **1.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA DE LA EMPRESA**

**Comienzos** <sup>1</sup>. La aviación colombiana nació gracias a las inquietudes de un grupo de caballeros con influencias en las altas esferas del gobierno en la época. Fue así como el día 07 de septiembre de 1916 al impulso del club colombiano de aviación convertido en un positivo "grupo de presión", el congreso nacional expidió la novísima ley número 15 de 1916 por la cual se disponía el envío a Europa de una comisión de militares, para enterarse de los avances bélicos pero principalmente de la aviación.

Al sancionar esta primera ley aérea el señor presidente de la república don José Vicente Concha exclamó: " Está muy cercano el día en que Colombia tenga su propia aviación".

Conocidas las experiencias de la primera guerra mundial sobre el empleo de la aviación como arma de combate, una vez superados los problemas económicos, el congreso colombiano exhortado por el señor presidente Marco Fidel Suárez demostró la necesidad de que las instituciones militares fortalecieran sus capacidades introduciendo definitivamente en su organización las unidades aéreas.

En 1920, se crea la Escuela Militar de Aviación que empieza a funcionar en predios de la Hacienda San Luís, vereda de Camalá en Flandes, Tolima.

---

<sup>1</sup> Escuela militar de Aviación Marco Fidel Suárez [en línea]. Santiago de Cali: Fuerza Aérea Colombiana, 2006. [consultado 26 de febrero, 2006]. Disponible en Internet: [www.emavi.edu.co](http://www.emavi.edu.co)

El 21 de septiembre de 1933 la Escuela fue trasladada a la Hacienda. El Guavito ubicada en Cali, a donde llegaron 20 alumnos que, en diciembre de ese mismo año se graduaron como pilotos del curso No. 3.

En sus inicios, la Escuela Militar contó con la asesoría de las Misiones Aéreas Francesa, Suiza, Alemana y norteamericana; para instrucción de los pilotos que iniciaban su carrera.

Gracias a la alta calidad y profesionalismo que se observó en nuestros pilotos en el año de 1936, el Gobierno delegó toda la responsabilidad y la preparación de la aviación militar en manos de hombres colombianos exclusivamente.

Cabe anotar también que, entre los años de 1935 y 1955, la Escuela recibió el nombre de "Ernesto Samper" en honor a un ilustre piloto comercial de entonces.

Desde entonces, la Escuela viene graduando promociones de oficiales en las diferentes especialidades de pilotos, navegantes, abastecimiento, mantenimiento, infantería de aviación, y comunicaciones. A partir de 1993 se profesionalizó la carrera de los oficiales con aprobación del Instituto Colombiano para el Fomento de la Educación Superior, con el fin de otorgarles el título de administradores aeronáuticos.

La Escuela Militar de Aviación, alma mater de la aviación militar ha ido escalando peldaños y formando oficiales idóneos que día a día engrandecen el nombre de la FAC.

**1.2.2 Misión.** La EMAVI forma integralmente los futuros oficiales de la FAC; capacita como pilotos de ala fija a Oficiales de la Fuerza Pública y desarrolla operaciones aéreas en el área de responsabilidad, contribuyendo al cumplimiento de la misión institucional.

**1.2.3 Visión.** La EMAVI será una institución militar de educación superior, con el mejor talento humano, acreditada y certificada en sus procesos, a la vanguardia de la investigación y el desarrollo aeroespacial; fortalecida en la ejecución de operaciones aéreas en el área de su responsabilidad.

## **2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

En Colombia la fuerza aérea esta iniciando con gran aceptación la investigación de nuevos proyectos, para el continuo avance tecnológico que esta afrontando nuestro país.

El centro de investigaciones CITA de la fuerza aérea esta viendo la necesidad de simular y entender el comportamiento de las fuerzas y momentos que se presentan en aeromodelos, con el fin de facilitar la obtención de datos e interpretarlos para poder aplicarlos en modelos de aviones reales, para su futura construcción aquí en Colombia.

De aquí parte la investigación y diseño para ubicar un aeromodelo, el cual estará fijo a una balanza, en varias posiciones angulares en dos grados de libertad (elevación y rotación).

Se debe tener un respectivo control en el cual no influya en los datos obtenidos para los análisis futuros, este debe ser muy preciso ya que las fuerzas que interactúan sobre este sistema son altas.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseño y control del Sistema de Posicionamiento de Balanza Aerodinámica para el Túnel de Viento Subsónico de La Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Establecer las necesidades específicas que requiere la empresa.
- Analizar productos competidores y generar ideas para el desarrollo de un mejor producto.
- Generar, seleccionar y probar diferentes conceptos que resuelvan las especificaciones establecidas previamente teniendo en cuenta diferentes criterios técnico-económicos y evaluando su impacto social y medio ambiental.
- Realizar un diseño detallado del producto que especifique cada una de las funciones que ejecuta el prototipo.
- Desarrollar el diseño acorde a las necesidades planteadas y que se ajuste al túnel de viento existente en la EMAVI.
- Diseñar los respectivos parámetros de control para el posicionamiento de la balanza.
- Mencionar la instrumentación mas adecuada para la medición de las variables a hallar.

#### **4. JUSTIFICACION**

Estamos en un continuo cambio tecnológico y Colombia apenas esta siendo parte de el, en comparación con otros países; de aquí parte la necesidad de implementar nuevos estudios apoyados por el gobierno para la optimización no solo de procesos si no también investigaciones que ayudan a mejorar las bases tecnológicas para la defensa de nuestro país.

La justificación de este proyecto puede tener varios puntos de vista, pero el más importante surge dada la gran necesidad de realizar pruebas de laboratorio por parte de los investigadores de la Fuerza Aérea Colombiana, para la construcción de nuevos aviones y para el aprendizaje de futuros ingenieros oficiales de la FAC.

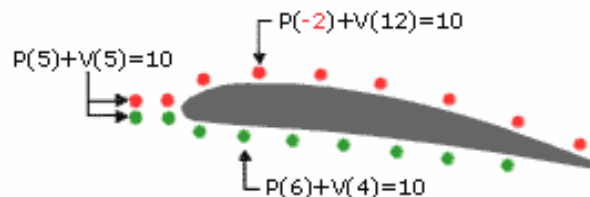
## 5. MARCO TEORICO

Para la realización de este proyecto es necesario saber sobre algunos conceptos de aerodinámica; esta es la parte de la mecánica de fluidos que estudia los gases en movimiento y las fuerzas o reacciones a las que están sometidos los cuerpos que se hallan en su seno. A la importancia propia de la aerodinámica hay que añadir el valor de su aportación a la aeronáutica. De acuerdo con el *número de Mach* o velocidad relativa de un móvil con respecto al aire, la aerodinámica se divide en *subsónica* y *supersónica* según que dicho número sea inferior o superior a la unidad<sup>2</sup>.

Hay ciertas leyes de la aerodinámica, aplicables a cualquier objeto moviéndose a través del aire, que explican el vuelo de objetos más pesados que el aire. Para el estudio del vuelo, es lo mismo considerar que es el objeto el que se mueve a través del aire, como que este objeto esté inmóvil y es el aire el que se mueve (de esta última forma se prueban en los túneles de viento prototipos de aviones).

Daniel Bernoulli comprobó experimentalmente que "la presión interna de un fluido (líquido o gas) decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa", o dicho de otra forma "en un fluido en movimiento, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante", es decir que  $p + v = k$ .

**Figura 1.** Teorema de Bernoulli



Para que se mantenga esta constante  $k$ , si una partícula aumenta su velocidad  $v$  será a costa de disminuir su presión  $p$ , y a la inversa.

El teorema de Bernoulli se suele expresar en la forma  $p + 1/2 \rho v^2 = \text{constante}$ , denominándose al factor  $p$  presión estática y al factor  $1/2 \rho v^2$  presión dinámica.

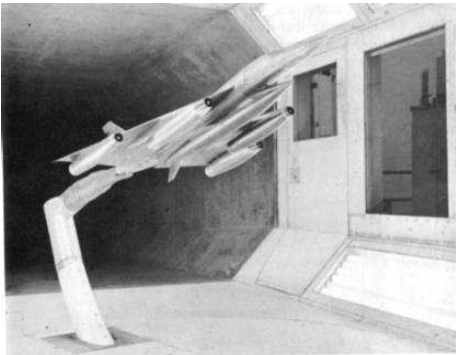
<sup>2</sup> M.A. Muñoz. Principios Aerodinámicos [en línea]. Madrid España: Manual de Vuelo, 2002. [consultado 10 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [www.inicia.es/de/vuelo/PBV/PBV12.html](http://www.inicia.es/de/vuelo/PBV/PBV12.html)

$$\text{Ecuación 1} \rightarrow p + 1/2 \, dv^2 = k; \quad 1/2 \, dv^2 = pd$$

**p**=presión en un punto dado.      **d**=densidad del fluido.      **v**=Velocidad en dicho Punto.  
**pd**=presión dinámica.

En el estudio de la aviación se construyen diferentes prototipos para medir diferentes variables depende de la aplicación deseada, pero especificaremos 2 prototipos de los mas importantes, como podemos ver en la figura 2 este prototipo es realizado en la nasa<sup>3</sup> para aviones de gran velocidad y de resistencia a grande alturas y grande presiones, y en la figura 3 Este diseño<sup>4</sup>, posee 6 grados de libertad en el cual se realizan muchas pruebas como determinar fuerzas de sustentación y resistencia y momento de cabeceo, fuerza lateral y momento de guiñada y rolido presiones en diferentes puntos sobre la superficie.

**Figura 2.** Soporte de Bayoneta ó Pértiga-Nasa



**Figura 3.** Modelo IA-63 PAMPA



<sup>3</sup> SANCHEZ, Walter O.. Soporte de Bayoneta ó Pértiga [en línea]. Córdoba Argentina, 2004. [consultado 11 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [http://ar.geocities.com/wwwsanchez/apendice\\_a.htm](http://ar.geocities.com/wwwsanchez/apendice_a.htm)

<sup>4</sup> INSTITUTO UNIVERSITARIO AERONÁUTICO. Túnel de Viento Subsónico Mayor [en línea]. Córdoba Argentina: La Universidad de la Fuerza Aérea, 2006. [consultado 11 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [www.iaa.edu.ar/Investigación/túnel/espanol/mswt.htm](http://www.iaa.edu.ar/Investigación/túnel/espanol/mswt.htm).

## **6. METODOLOGIA**

El proyecto se llevará a cabo en 6 meses, comenzando a mediados del mes de Febrero de 2006 y terminando a mediados del mes de Julio de 2006. El proyecto está dividido básicamente en tres etapas.

La primera etapa tiene que ver con la base teórica necesaria para el desarrollo del Trabajo, con el objetivo de conceptuar el problema. Estudiando de esta manera las necesidades exigidas por el cliente, el funcionamiento de algunos productos similares. Para luego generar una serie de conceptos que serán probados llegando así a la selección del mejor concepto.

La segunda etapa tiene que ver con el diseño y simulación virtual, donde se llevara a cabo un diseño detallado de todas las partes de la máquina para obtener de esta forma el diseño completo del producto deseado.

La tercera etapa es el control e instrumentación, esta etapa se hace necesaria para la futura fabricación del proyecto con un óptimo desempeño y rendimiento para mejores pruebas para la construcción de futuros aviones.

Por ultimo se redactara el informe final exponiendo los resultados obtenidos a lo largo del proyecto.



## **7. DESARROLLO DEL PROYECTO**

### **7.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE DISEÑO**

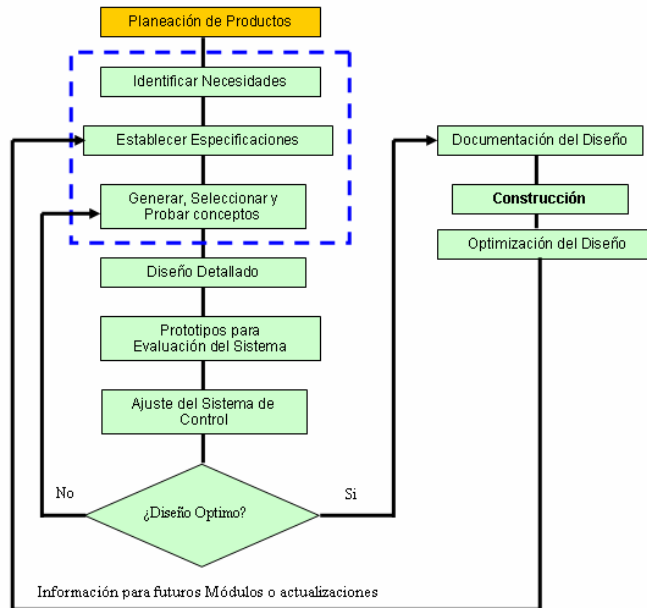
La planeación de un proyecto es una parte de gran importancia a la hora de llevar a cabo un proceso de diseño puesto que por medio de ella podemos identificar con claridad las necesidades del cliente, estas necesidades son claves en este tipo de procesos ya que gracias a ellas se puede diseñar de acuerdo con los requerimientos funcionales, estéticos y restricciones que el interesado en el producto demande.

Este proceso permite evaluar la satisfacción de las necesidades del cliente en algunos productos competidores lo cual nos permite realizar mejoras en el producto que se va a diseñar respecto a los diseñados con anterioridad.

Con el análisis mencionado anteriormente se puede restringir el diseño dándole a este unas especificaciones preliminares las cuales nos permitirán generar una serie de conceptos, de los que se seleccionaran los que mejor se adapten al resultado esperado.

Por último se realiza una prueba usando herramientas computacionales o prototipos rápidos de cada uno de los conceptos seleccionados lo que nos dará la aprobación para llevar a cabo un diseño detallado con la plena seguridad de que este será exitoso.

**Figura 4.** Planeación de productos



## 7.2 PLANTEAMIENTO DE LA MISION

### Descripción del Problema:

- Dispositivo posicionador para simulación de fuerzas y momentos en aeromodelos.

### Principales Objetivos del Marketing:

- Diseñar un sistema Mecatrónico para posicionar aeromodelos en un túnel de viento.
- Simular diferentes formas aerodinámicas de aviones y parte de ellos.

- Visualizar diferentes fuerzas y momentos que ejerce el viento en un avión en diferentes posiciones.
- Desarrollar un sistema simple y funcional.

#### **Mercado Primario:**

- Escuela Militar de Aviación (EMAVI).

#### **Mercado Secundario:**

- Escuelas aeronáuticas o Fuerzas Militares de otros países.

#### **Permisas y Restricciones:**

- Dispositivo Mecatrónico que permita la sujeción y manipulación de aeromodelos.
- Carga máxima de los aeromodelos 500gm
- El tamaño de la balanza debe de ser acorde al túnel de viento.
- Debe de tener control en 2 grados de libertad.
- Utilizar galgas extensiométricas.
- Permitir ver en tiempo real las fuerzas que interactúan en los respectivos aeromodelos.
- La resolución del posicionamiento debe ser de  $0.1^\circ$ .

### **Partes implicadas:**

- Escuela Militar de Aviación.
- Centro de investigación CITA.
- Proveedor de partes y elementos.
- Grupos estudiantiles.

## **7.3 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES DEL CLIENTE**

Para el óptimo diseño de un producto se debe tener en cuenta la identificación de las necesidades del cliente. Por esta razón se organizó una lista de necesidades donde se destacan tres grandes grupos; necesidades funcionales, necesidades estructurales y necesidades estéticas, luego se le dio un nivel de importancia a cada una de estas necesidades.

Por último la tabla 1 muestra la identificación de las necesidades donde se traduce cada necesidad a un lenguaje técnico para luego poder analizarlas detalladamente.

### **7.3.1 Lista de Necesidades del Cliente**

#### ***Necesidades funcionales.***

- Que el aeromodelo tome diferentes posiciones.
- Que se puedan visualizar los datos que se generan en las diferentes pruebas.

- Que el software lleve una plataforma particular y entendible.
- Que sea preciso.

#### ***Necesidades estructurales.***

- Se quiere que la balanza sea a escala del túnel de viento.
- Que se puedan hacer rediseños sobre su misma plataforma.
- Facilidad para acoplar no solo aeromodelos si no también parte de ellos.
- Que su estructura no perjudique en la toma de datos.
- Que el material escogido para la estructura sea acorde con las respectivas deformaciones para que no se vean afectadas la toma de medidas.

#### ***Necesidades estéticas y económicas.***

- Que tenga buena presentación.
- Que el presupuesto para la futura construcción de la balanza sea viable.
- Que su estructura sea fácil de entender.
- Se requiere que la balanza tenga un consumo de corriente razonable.

La tabla 1 muestra a continuación las especificaciones del producto y describe lo que debe hacer el producto sin decir cómo.

**Tabla 1.** Identificación de las necesidades del cliente

<b>Necesidades Funcionales</b>	
<b>1.</b> Que el aeromodelo tome diferentes posiciones.	La posición del aeromodelo llevara una consola de mando.
<b>2.</b> Que se puedan visualizar los datos que se generan en las diferentes pruebas.	El sistema podrá observar las variables medidas por un centro de mando.
<b>3.</b> Que sea preciso.	Llevara la instrumentación de acuerdo a la resolución requerida por el cliente.
<b>4.</b> Que el software lleve una plataforma particular y entendible.	Este será de la manera más eficaz y sencilla posible.
<b>Necesidades Estructurales</b>	
<b>5.</b> Se quiere que la balanza sea a escala del túnel de viento.	La balanza contara con un tamaño acorde a los movimientos correspondientes a realizar.
<b>6.</b> Que se puedan hacer rediseños sobre su misma plataforma.	La plataforma se diseñara en módulos para su rediseños a medida que cambia la tecnología.
<b>7.</b> Facilidad para acoplar no solo aeromodelos si no también parte de ellos.	Contara con un soporte para diferentes partes de aviones.
<b>8.</b> Que su estructura no perjudique en la toma de datos.	La estructura ira fuera del túnel de viento para evitar información errónea.
<b>9.</b> Que el material escogido para la estructura sea acorde con las respectivas deformaciones para que no se vean afectadas la toma de medidas.	Será de un material que no se fracture o se dañe ya que perjudicaría en los datos deseados.
<b>Necesidades Estéticas y Económicas</b>	
<b>10.</b> Que tenga buena presentación.	De forma, colores y medidas llamativas.
<b>11.</b> Que el presupuesto para la construcción de la balanza sea viable.	El diseño de la balanza no excederá el presupuesto asignado
<b>12.</b> Que su estructura sea fácil de entender.	Será una estructura sencilla y funcional, debidamente etiquetada para el buen entendimiento.
<b>13.</b> Se requiere que la balanza tenga un consumo de corriente razonable.	Se hará diseño de mecanismos para ayudar al consumo de energía.

**7.3.2 Especificaciones del producto:** Este proceso consiste en dar medidas o valores a las traducciones medibles de las necesidades.

En las dos tablas mostradas a continuación se establecen las métricas con sus unidades y se relaciona cada una de ellas con las necesidades de la tabla anterior.

**Tabla 2.** Declaración de las métricas con sus necesidades.

# Métrica	# Necesidad	METRICA	Imp	Unidad
1	5,7,8,10,11,12	Dimensiones	4	cm.
2	1,2,3,4,8	Visualización de variables	5	I/O
3	1,2,3,8,9	Medición de variables	5	Lista 1
4	1,2,3,4,13	Resolución en movimientos	5	°
5	5,6,10,11,12	Diseño atractivo	3	Subj
6	2,3,5,6,7	Compatibilidad con aeromodelos y parte de ellos	4	Lista 2
7	1,2,3,4	Comunicación PC-sistema a través de una Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)	5	I/O

Lista 1(Medición de Variables)	Unidades
Posición de aeromodelo	#°
Fuerzas	N
Momentos	Nm

Lista 2(Compatibilidad)	Unidades
Aeromodelos	Und
Alas	Und
Cola	Und
Frente	Und

**Tabla 3.** Relación de las métricas con las necesidades.

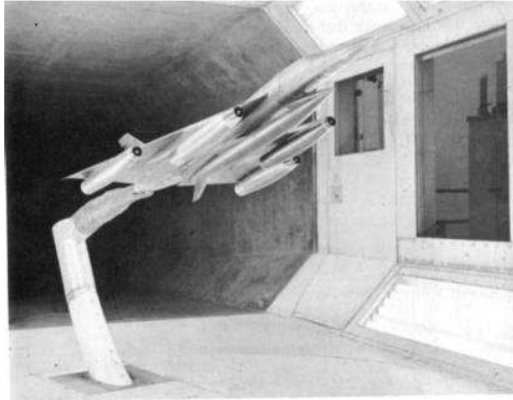
#	Necesidad	#	1	2	3	4	5	6	7
		Métrica	Dimensiones	Visualización de variables	Medición de variables	Resolución en movimientos	Diseño atractivo	Compatibilidad con aeromodelos y parte de ellos	Comunicación PC-sistema a través de una Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)
1	Que el aeromodelo tome diferentes posiciones.	5		9	9	9			9
2	Que se puedan visualizar los datos que se generan en las diferentes pruebas.	5		9	9			3	5
3	Que sea preciso.	3		9	9	9		3	9
4	Que el software lleve una plataforma particular y entendible.	4		5		9			9
5	Se quiere que la balanza sea a escala del túnel de viento.	4	9				3	3	
6	Que se puedan hacer rediseños sobre su misma plataforma.	3					5	5	
7	Facilidad para acoplar no solo aeromodelos si no también parte de ellos.	4	5					9	
8	Que su estructura no perjudique en la toma de datos.	5	5	9	9				
9	Que el material escogido para la estructura sea acorde con las respectivas deformaciones para que no se vean afectadas la toma de medidas.	4			9				
10	Que tenga buena presentación.	3	3				9		
11	Que el presupuesto para la construcción de la balanza sea viable.	4	5				5		
12	Que su estructura sea fácil de entender.	2	3				5		
13	Se requiere que la balanza tenga un consumo de corriente razonable.	3				5			
<b>TOTAL</b>			<b>116</b>	<b>162</b>	<b>198</b>	<b>123</b>	<b>84</b>	<b>87</b>	<b>133</b>

Como se observa en la tabla 3 las necesidades mas importantes para los clientes son visualización de variables, la medición de las mismas y la resolución del movimiento de los motores para posicionar la balanza, gracias a este método se obtendrá una mayor satisfacción del cliente

**7.3.3 Benchmarking:** En este estudio se analiza detalladamente la satisfacción de las necesidades del cliente en productos competidores otorgando una calificación de 1 a 5, esto con la finalidad de diseñar un producto que cumpla con todas las necesidades del cliente y llene los espacios que la competencia ha dejado.



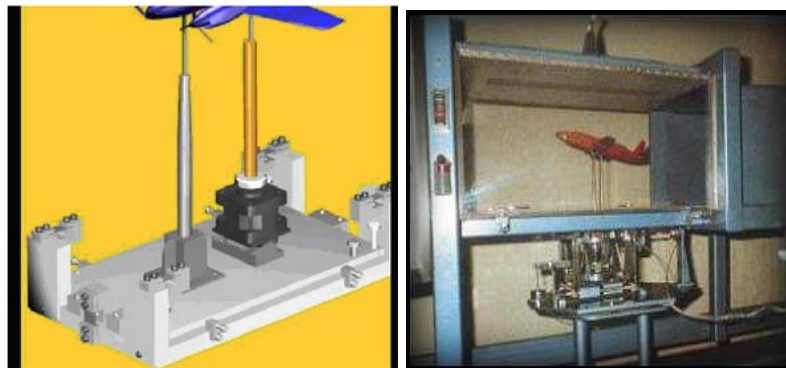
**Figura 5.** Soporte de Bayoneta ó Pértiga-Nasa



Balanza Aerodinámica utilizada en la NASA, la cual consta de un de un brazo rígido como soporte, y en su extremo superior tiene una articulación (hombro) que permite realizar los movimientos de elevación y rotación del aeromodelo para su respectivo estudio de fuerzas y momentos.

Este sistema es para probar las fuerzas en si sobre los aviones ya que su diseño es para soportar grande cargas sin sufrir deformaciones.

**Figura 6.** Laboratorio Aerolab



El modelo<sup>5</sup> Aerolab, su funcionamiento principal se basa en dos columnas que sostienen el aeromodelo, una de ellas esta fija a la plataforma como muestra en la Figura 6, y la otra de forma helicoidal acoplada a un motor paso a paso el cual permite simular el movimiento de elevación del aeromodelo, se puede considerar como practico y elemental modelo, pero su gran déficit radica en que solo nos permite estudiar un solo movimiento del avión.

**Figura 7.** Modelo IA-63 PAMPA



Este modelo es el mas completo, ya que posee una plataforma de forma circular el cual le que mas fácil girar en su propio eje si ocupar mas espacios, El sistema de soporte de modelos comprende básicamente un carro móvil deslizante sobre dos guías circulares que permiten el cambio de ángulo de ataque (incidencia). El carro puede a su vez moverse sobre una plataforma rotante que permite el posicionamiento en guiñada (deslizamiento).

Este diseño posee 6 grados de libertad en el cual se realizan muchas pruebas como determinar fuerzas de sustentación y resistencia y momento de cabeceo, fuerza lateral y momento de guiñada y rolido presiones en diferentes puntos, además de visualización de movimientos utilizando técnicas clásicas como películas de aceite o humo.

---

<sup>5</sup> Pyramidal balances [en línea]. Washington U.S.A: Aerolab, 2005. [consultado 11 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [www.aerolab.com](http://www.aerolab.com)

**Tabla 4. Benchmarking**

BENCHMARKING			Soporte de Bayoneta ó Pértiga-Nasa	Aerolab	Modelo IA-63 PAMPA
#	Necesidad	imp			
1	Que el aeromodelo tome diferentes posiciones.	5	5	2	5
2	Que se puedan visualizar los datos que se generan en las diferentes pruebas.	5	5	4	5
3	Que sea preciso.	5	5	3	5
4	Que el software lleve una plataforma particular y entendible.	4	2	4	3
5	Se quiere que la balanza sea a escala del túnel de viento.	4	1	3	5
6	Que se puedan hacer rediseños sobre su misma plataforma.	3	2	3	4
7	Facilidad para acoplar no solo aeromodelos si no también parte de ellos.	4	5	3	2
8	Que su estructura no perjudique en la toma de datos.	5	5	1	5
9	Que el material escogido para la estructura sea acorde con las respectivas deformaciones para que no se vean afectadas la toma de medidas.	4	4	4	4
10	Que tenga buena presentación.	3	4	1	5
11	Que el presupuesto para la construcción de la balanza sea viable.	4	1	2	3
12	Que su estructura sea fácil de entender.	2	4	3	4
13	Se requiere que la balanza tenga un consumo de corriente razonable.	3	1	4	3

**Tabla 5.** Especificaciones Preliminares

# Métrica	# Necesidad	METRICA	Imp	Unidad	Valor Marginal	Valor Ideal
1	5,7,8,10,11,12	Dimensiones (Ancho, Largo, Alto)	4	cm.	50*40*80	40*35*70
2	1,2,3,4,8	Visualización de variables	5	I/O	I	I
3	1,2,3,8,9	Medición de variables	5	Lista 1	I/O	I/O
4	1,2,3,4,13	Precisión en movimientos	5	#º	0.2º	0.1º
5	5,6,10,11,12	Diseño atractivo	3	Subj	Aceptable	Bueno
6	2,3,5,6,7	Compatibilidad con aeromodelos y parte de ellos	4	Lista	Lista	Lista
7	1,2,3,4	Comunicación PC-sistema a través de una Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)	5	I/O	I	I

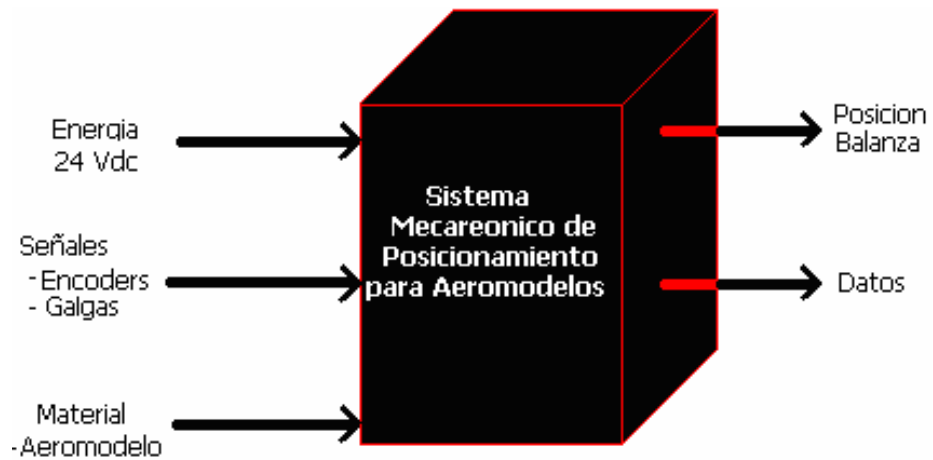
#### 7.4. GENERACIÓN, SELECCIÓN Y PRUEBA DE CONCEPTOS

Una visión clara del diseñador acerca de las necesidades primordiales del cliente a suplir es clave, para de esta manera dividir el gran conjunto de necesidades (problema), en subproblemas que facilitarán la generación de soluciones que se combinarán entre si, las cuales darán diversas opciones de solución desde diferentes enfoques de diseño.

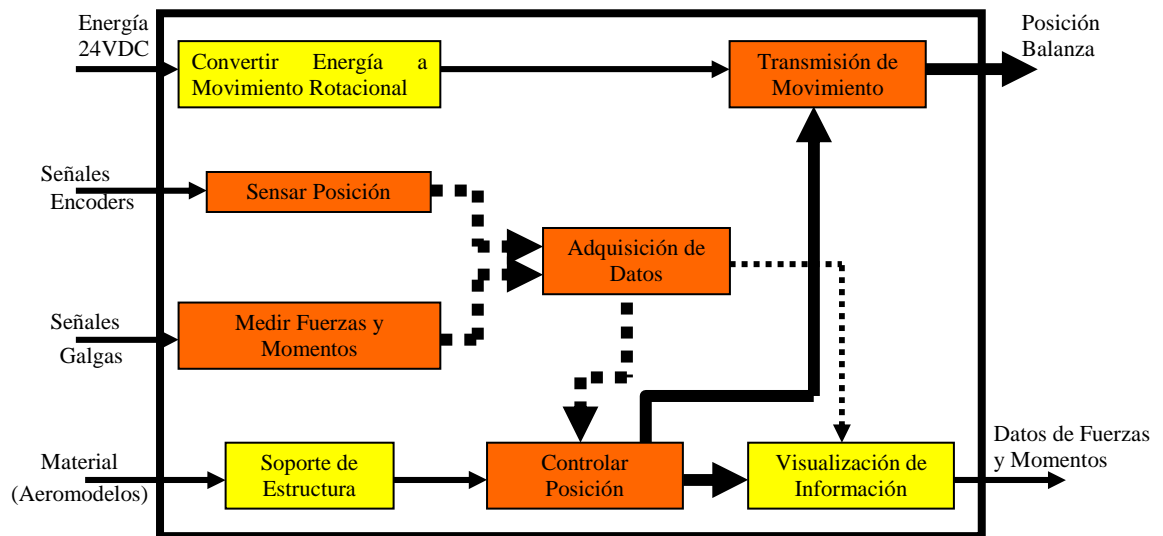
De la gran variedad de combinaciones se encontrará que no todas las opciones son viables y/o confiables, pero se trata de analizar los pro y contra de cada una, eligiendo finalmente una combinación que vaya de la mano con las necesidades del cliente y la experiencia del diseñador. Esta combinación o concepto seleccionado responde a todos los esfuerzos de diseño realizados con anterioridad y a las ambiciones del grupo de trabajo, dando lugar al desarrollo de un producto competitivo, evidenciando la real importancia del aprovechamiento del proceso estructurado de diseño y desarrollo de productos.

### 7.4.1 Generación de conceptos

**Figura 8.** Caja negra



**Figura 9.** Descomposición Funcional.



#### **7.4.1.1 Conceptos generados por subfunciones**

##### ***Convertir energía en movimiento rotacional***

- Motor eléctrico DC.
- Servomotor.
- Motorreductor eléctrico DC.
- Motor Paso a Paso.
- Motor hidráulico

##### ***Sensar Posición***

- Encoder absoluto.
- Encoger incremental.
- Sensor inductivo.
- Sensor capacitivo.
- Sensor óptico

### ***Sensar fuerzas y momentos***

- Celda de carga.
- Balanza digital.
- Dinamómetro.
- Galga extensiométrico.

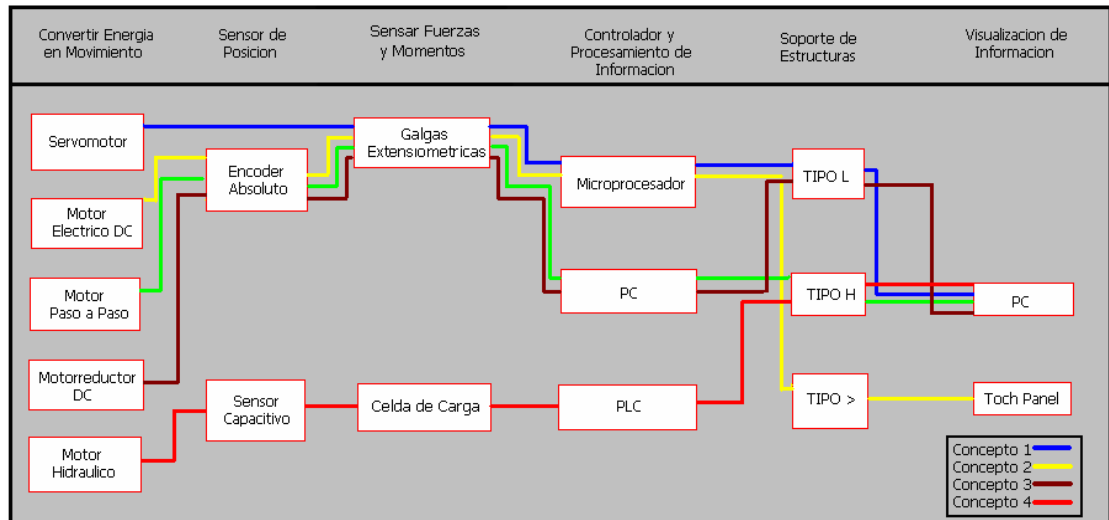
### ***Controlador y Procesamiento de información***

- PLC.
- Microcontrolador.
- PC.
- Compuertas lógicas.

### ***Visualización de información***

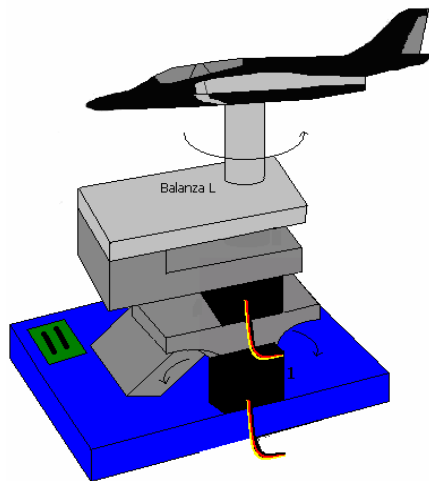
- LCD.
- Display 7 segmentos.
- PC.
- Touch panel

**Figura 10.** Combinación de Conceptos



A continuación se mostrarán los bosquejos de los conceptos propuestos:

**Figura 11.** Concepto 1



### Concepto 1:

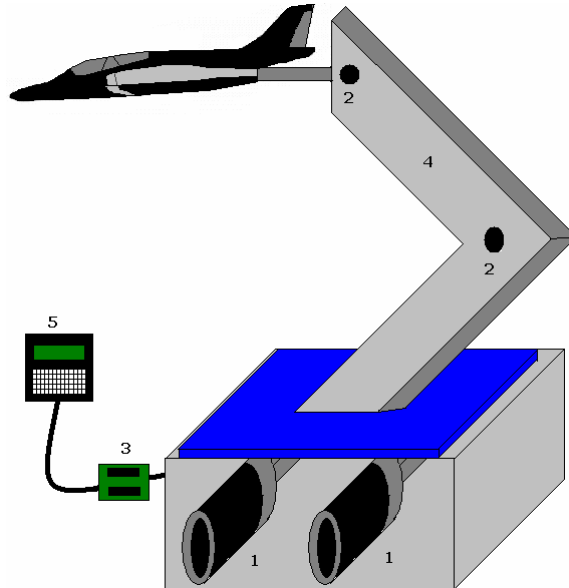
- Servomotor (1).
- Galgas Extensiométricas.
- Microprocesador (3).
- Balanza tipo L (4).
- Muestreo por PC.



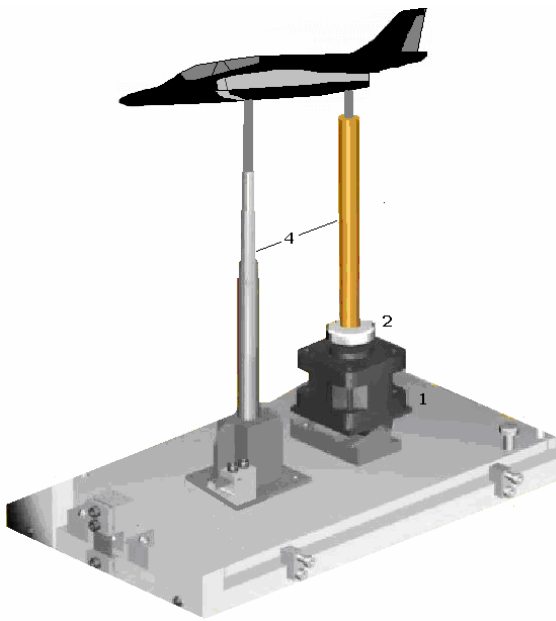
## Concepto 2:

- Motor Eléctrico DC (1).
- Encoder Absoluto (2).
- Galgas Extensiometricas.
- Microprocesadores (3).
- Balanza tipo > (4).
- Touch Panel (5).

**Figura12.** Concepto 2



**Figura 13.** Concepto 3



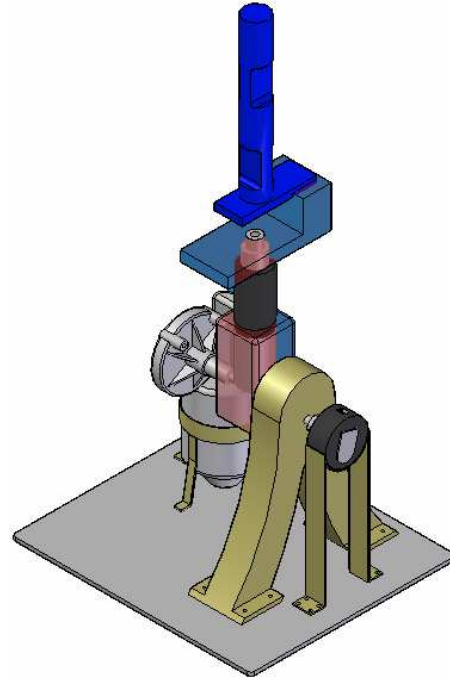
## Concepto 3:

- Motor paso a paso (1).
- Encoder Absoluto (2).
- Galgas Extensiométricos.
- Muestreo y controlador por PC.
- Balanza tipo H (4).

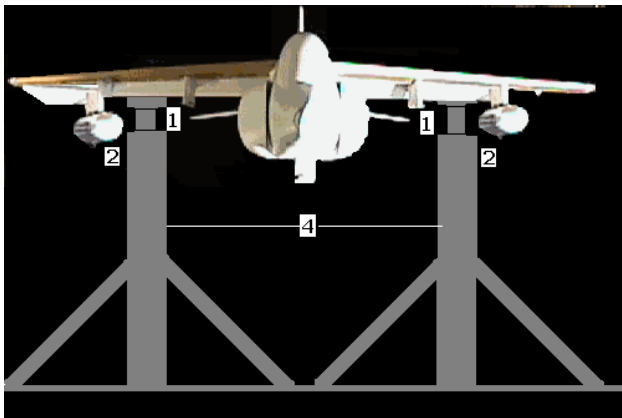
#### Concepto 4:

**Figura 14.** Concepto 4

- Motorreductor DC.
- Encoder absoluto.
- Galgas Extensiométricos.
- Balanza tipo L.
- Muestreo y controlador Por PC.



**Figura 15.** Concepto 5



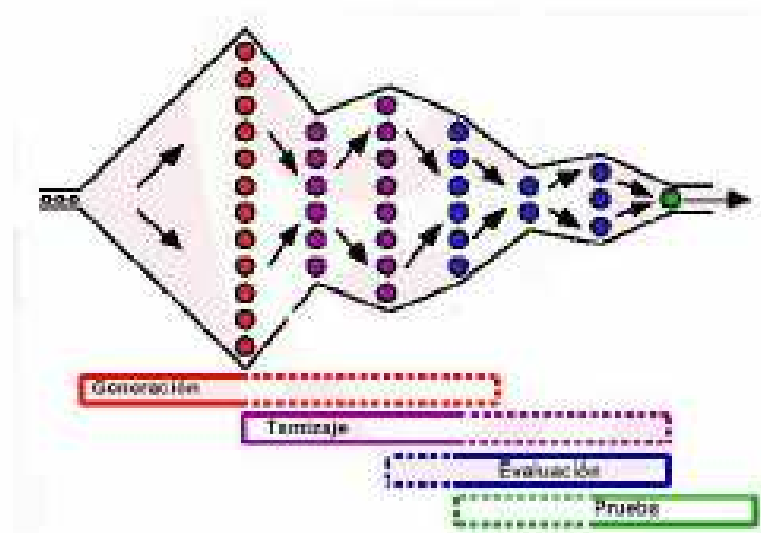
#### Concepto 5:

- Motor Hidráulico (1).
- Sensor capacitivo (2).
- Celda de Carga.
- PLC .
- Balanza tipo H (4).
- Muestreo por PC.

**7.4.2 Selección de conceptos.** Para la selección de este concepto se utilizaron criterios relativos de evaluación donde se selecciona un producto existente como referencia y se valoran los conceptos de forma conjunta.

Este es un método estructurado basado en las necesidades ponderadas del consumidor que consta de dos partes; una matriz de tamizaje donde se filtran algunos conceptos y una matriz de evaluación donde se elige el concepto que se va a desarrollar.

**Figura 16.** Embudo de Selección de Conceptos



Como referencia para la tabla 6, se tomó el diseño Modelo IA-63 PAMPA, el cual fue considerado por nosotros el modelo más competitivo además de tener todas las especificaciones requeridas para un túnel de viento ya que este mide todas las fuerzas y momentos que se presentan en un avión.

**Tabla 6.** Matriz de Tamizaje

		Conceptos					
Criterios de selección		1	2	3	4	5	Ref.
Dimensiones.		+	0	+	+	-	0
Visualización de variables.		0	0	-	+	-	0
Medición de variables.		+	-	-	0	-	0
Precisión en movimientos.		+	-	-	0	0	0
Diseño atractivo.		0	+	+	+	+	0
Compatibilidad con aeromodelos y partes de ellos.		-	+	0	0	-	0
Comunicación PC-sistema a través de una Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)		0	0	0	0	0	0
Costos Total.		0	-	0	+	-	0
	Positivos	3	2	2	4	1	
	Iguales	4	3	3	4	2	
	Negativos	1	3	3	0	5	
	Total	2	-1	-1	4	-4	
	¿Continuar?	SI	NO	NO	SI	NO	

- + Mejor que...
- 0 Igual a...
- Peor que...

**Tabla 7.** Matriz de evaluación de conceptos

		Conceptos					
Criterios de selección	Ponderación %	1		4		Ref	
Dimensiones.	10	4	0.4	4	0.4	3	0.3
Visualización de variables.	10	3	0.3	4	0.4	3	0.3
Medición de variables.	20	4	0.8	5	1	4	0.8
Precisión en movimientos.	20	4	0.8	5	1	4	0.8
Diseño atractivo.	5	3	0.1	2	0.1	2	0.1
Compatibilidad con aeromodelos y parte de ellos.	15	4	0.6	4	0.6	3	0.4
Comunicación PC-sistema a través de una Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)	10	3	0.3	4	0.4	2	0.2
Costos Total.	10	2	0.2	3	0.3	2	0.2
TOTAL		3.55		4.2		3.1	
¿Desarrollar?		NO		SI			

- ✓ 1 Mucho peor que...
- ✓ 2 Peor que...
- ✓ 3 Igual a
- ✓ 4 Mejor que...
- ✓ 5 Mucho mejor que...

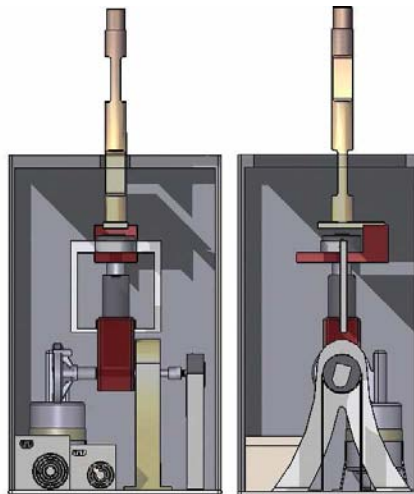
**7.4.3 Prueba de conceptos.** La prueba de cada concepto se realizó por medio de criterios pasa / no pasa, donde se tomó cada una de las subfunciones y se hizo una serie de pruebas para comprobar la viabilidad del concepto seleccionado.

El concepto seleccionado fue el 4 ya que cumplía con todas las necesidades del cliente en tanto a fuerza, posición y además de estética ya que es un diseño muy simple.

## 7.5 ESPECIFICACIONES FINALES DEL DISEÑO

Diseño de sistema Mecatrónico de posicionamiento de una balanza aerodinámica para un túnel de viento subsónico para la simulación de aeromodelos con dos grados de libertad (elevación y rotación), con el fin de simular fuerzas y momentos que se presentan en estos para la construcción de aviones y partes de ellos.

**Figura 17.** Diseño escogido (concepto 4).



Este diseño se escogió gracias a las necesidades planteadas por el cliente, se diseñó de manera robusta ya que tendrá que soportar grandes fuerzas tanto de arrastre, como de retención por parte de los motores.

Como resultado de la segunda etapa del proceso de diseño y desarrollo se obtiene la tabla de especificaciones finales, las cuales son fundamento para llevar a cabo la etapa de diseño detallado.

Estas especificaciones al estar sujetas a un proceso de diseño, pueden variar en el transcurso del mismo, debido a cambios o eventos inesperados.

**Tabla 8.** Especificaciones técnicas

# Métrica	METRICA	Imp	Unidad	Valor
1	Dimensiones (Ancho, alto, Largo)	4	cm.	30*35*65
2	Visualización de variables	5	I/O	I
3	Medición de variables	5	Lista 1	
4	Precisión en movimientos	5	#°	0.1°
5	Diseño atractivo	3	Subj	Bueno
6	Compatibilidad con aeromodelos y parte de ellos	4	Und	
7	Comunicación PC-sistema a través de cualquier puerto	5	I	I

Lista 1(Medición de Variables)	Units
Posición de aeromodelo	#°
Fuerzas	N
Momentos	Nm

## 7.6 DISEÑO DETALLADO

Diseño de sistema Mecatrónico de posicionamiento de una balanza aerodinámica para un túnel de viento subsónico para la simulación de aeromodelos se dividió en seis etapas; documentación electrónica, diseño arquitectural, diagramas de flujo, documentación mecánica y selección de la instrumentación y diseño del controlador; las cuales se trabajaran en forma concurrente.

**Figura 18.** Diseño secuencial vs. Concurrente

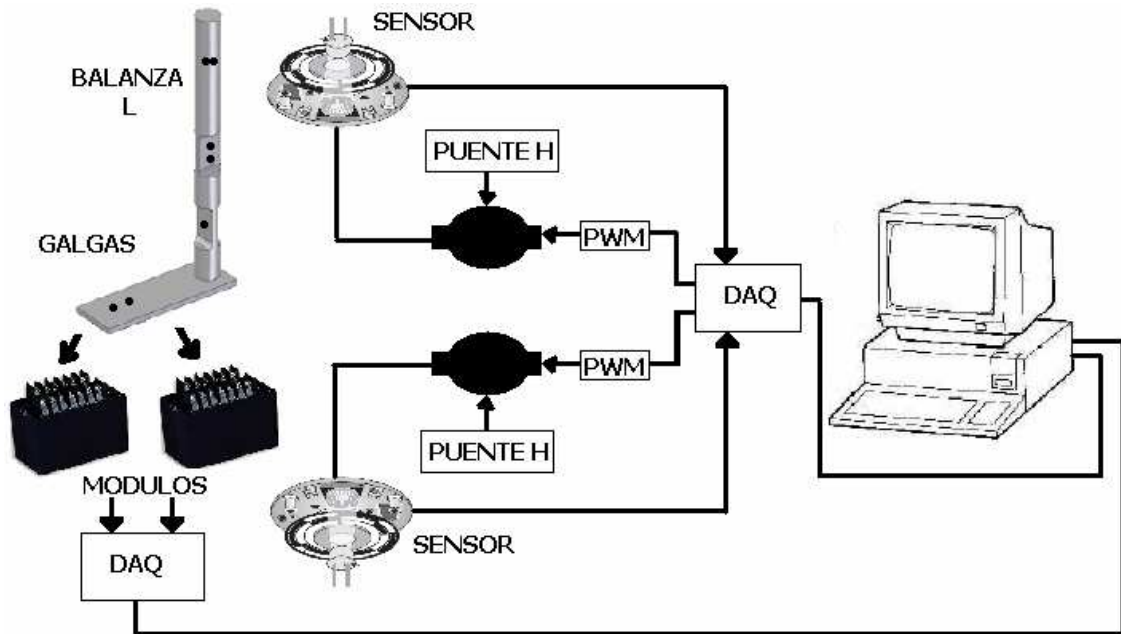


En la figura 18 muestra de manera grafica el funcionamiento y acople de la todo el sistema tanto mecánico, electrónico y software, de manera detallada para el mejor entendimiento; el sentido de las flechas muestra el sentido por donde pasa la señales.

Para la figura 19, en la balanza se puede observar unos puntos negros, ahí es donde van las respectivas galgas para determinar los esfuerzos ejercidos sobre el aeromodelo, las señales que entregan estas se dirigen a unos módulos los cuales van a amplificar y a instrumentar la señales y de aquí pasan a una DAQ (Tarjeta de Adquisición de Datos) para poder llegar al PC para su respectiva visualización.

El control de los motores se van a dar por medio del PC, el cual transmite señales por otra DAQ para poder ordenar la los DRIVERS (puente H - PWM) de cada motor cuando moverse y para la posición exacta están dos sensores los cuales van a estar realimentando la posición constantemente mandando señales análogas a la DAQ para el controlador elaborado en Matlab, todo se mostrara en la figura 19.

**Figura 19.** Esquema funcional



**7.6.1 Convertir energía a movimiento rotacional.** Para el concepto seleccionado se tomo la decisión de motorreductor DC, ya que posee la fuerza y el tórque necesario para mover y soportar grandes estructuras, además de su fácil control.

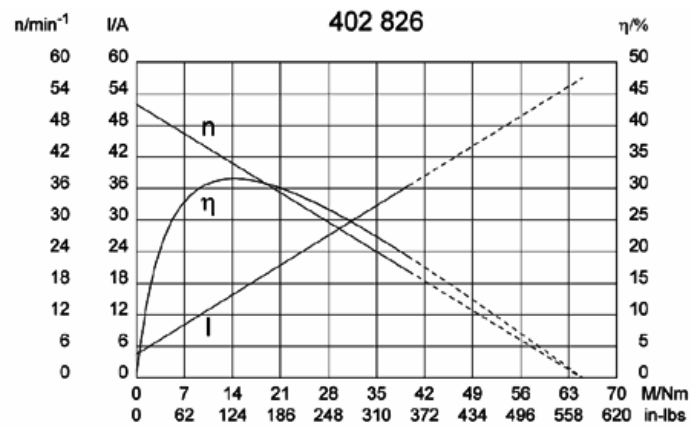
Se seleccionaron 2 tipos de motores; a continuación se muestran los que mejor cumplen con todas las características y comportamientos del sistema a diseñar que es el troqué nominal y además el de retención, este se muestra en el grafico 20.

**Figura 20.** Motorreductor Marca Valeo serie 402826





**Figura 21.** Curva Característica motor Valeo serie 402826



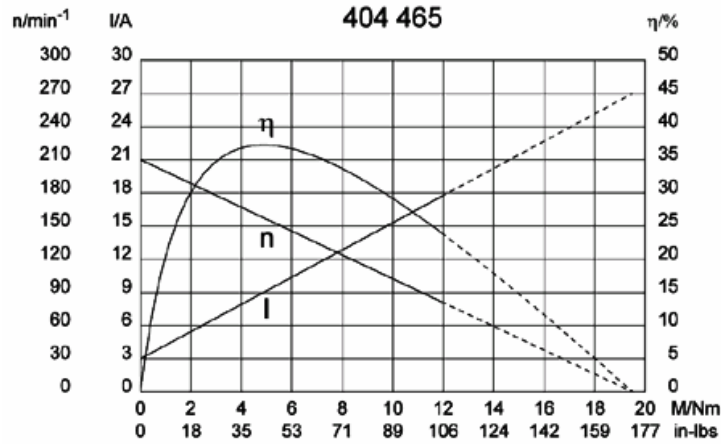
**Ver Anexo A.**

El segundo motor que se escogió cumple tanto con las fuerzas requeridas como la dimensiones adecuado para un óptimo diseño e implementación:

**Figura 22.** Motorreductor Marca Valeo serie 404465



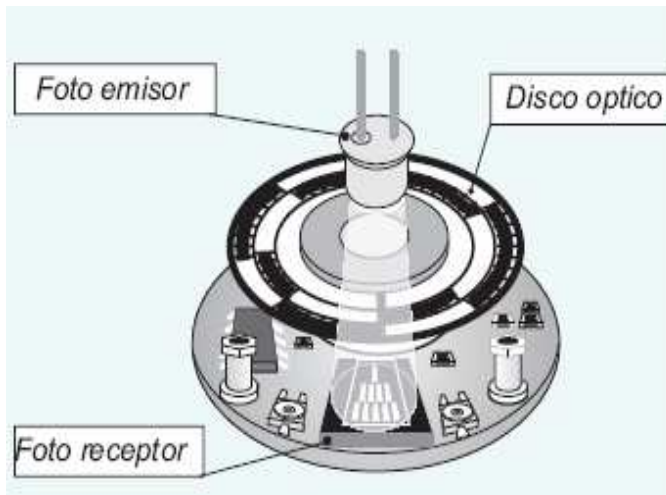
**Figura 23.** Curva Característica motor Valeo serie 404465



Ver Anexo B.

**7.6.2 Sensor de posición.** En el concepto seleccionado la forma de mejor sensor la posición fue un Encoder Absoluto ya que este posee una buena precisión, además es muy fácil de trabajar.

**Figura 24.** Encoder Absoluto



El funcionamiento de estos radica en que un disco, con zonas transparentes y opacas gira interrumpiendo el haz de luz enviado hacia los fotorreceptores, luego estos transforman estos impulsos luminosos en impulsos eléctricos.

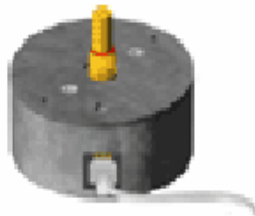
Dichos impulsos eléctricos se convierte en código GRAY, y para cada posición de eje del encoder asigna un valor binario único y diferente.

**Figura 25.** Código GRAY

DECIMAL	BINARIO	GRAY
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

El sensor escogido es el **A2** USDigital:

**Figura 26.** Sensor A2 USDigital

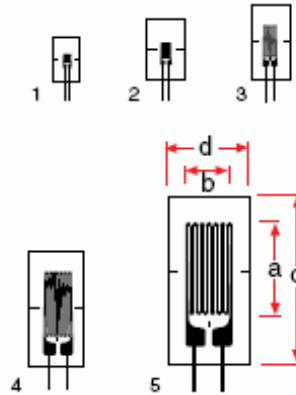


Este sensor fue escogido de acuerdo a sus características de resolución, ya que posee una salida analógica lineal, además ofrece una resolución de  $0,088^\circ$  que es mucho menor a la pedida por el CITA que es de  $0,1^\circ$ , lo cual hace el sistema mas preciso.

**Ver Anexo C.**

**7.6.3 Sensor Fuerzas y Momentos.** La galgas a utilizar son marca omega de 120 Ohm de referencia SG-6/120-LY-13; estas galgas fueron seleccionas ya que su tamaño se asemeja mas al diseño creado, las especificaciones y los datos que proporciona y serán las encargadas de medir las fuerzas en el aeromodelo, estas señales serán simplemente para monitoreo.

**Figura 27.** Dimensiones de las galgas



**Ver Anexo D.**

**Figura 28.** Balanza tipo L



#### 7.6.4 Balanza en L

- **Balanzas Internas:** Estas balanzas se encuentran localizadas dentro del modelo, fueron desarrolladas debido a la necesidad de excluir las fuerzas actuantes sobre los soportes.
- **Balanzas Externas:** En este tipo de balanzas, la fuerza aerodinámica total y momentos son separados en sus componentes con la ayuda de varios sistemas mecánicos. Estas balanzas suelen denominarse balanzas mecánicas.

**7.6.5 Procesamiento y visualización de la información.** Para poder tener el procesamiento de cada una de las señales de las galgas se tendrán módulos de instrumentación para 6 galgas cada uno.

## DMD-465

**Figura 29.** Modulo para toma de datos de las galgas



Este modulo no solo es para galgas extensiométricos, también, es utilizado para celdas de cargas y transductores, su función principal es la de instrumentar y amplificar la señal de salida para la toma de datos.

Tiene un Puente de excitación de 4 a 15 Vdc que trabaja a 120mA con resistencias de 120 Ohm en adelante, su ganancia y offset son ajustables

La adquisición de datos se dará por medio de una DAQ (Tarjeta de Adquisición de Datos) PDM-1208LS y para el procesamiento, la visualización de la información interfaz hombre - maquina tanto de las señales de control como de monitoreo se harán por medio de un PC a través del programa de simulación Matlab

## 8. DISEÑO ARQUITECTURAL

Para realizar este proceso se elaboró un modelamiento de las especificaciones con representaciones gráficas y textuales, lo que nos permite descomponer el sistema en varios objetos y de esta manera simplificar y optimizar la elaboración del software. Esto contribuye a brindar un diseño consistente que cumple con las especificaciones de los requerimientos.

### 8.1 DOCUMENTACIÓN MECÁNICA

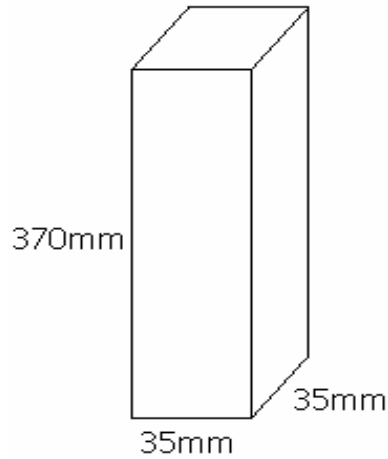
La documentación mecánica de la máquina de simulación consta de dos etapas; planos de partes propias del sistema y lista de partes.

**8.1.1 Planos de partes propias:** Para la elaboración de las partes de este diseño se tuvo en cuenta las fuerzas externas que se ejercen sobre el sistema (Fuerza del aire como el peso del aeromodelo y la estructura), también se tuvo en cuenta el comportamiento, peso, forma y tamaño de los motores para sus respectivos soporte por que estos en si, forman la estructura del diseño total.

**8.1.2 Diseño de Ejes:** A continuación se calcula el diámetro de los ejes que se encuentran en la estructura, cada uno de los componentes que esta sobre los ejes se toma como una caja llena para calcular sus pesos y así diseñar los ejes sobre sus casos más críticos.

**Balanza:** Para el cálculo del peso de la balanza se hizo una aproximación de su estado más crítico y se calcula el volumen con dichas dimensiones como se muestra en la figura 30, 30-1 y se trabaja con la densidad del aluminio que es el material requerido para dicha pieza.

**Figura 30.** Cubo Balanza Vástago



$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = l \times a \times h \Rightarrow (3,5cm)(37,0cm)(3,5cm)$$

$$V = 453,25cm^3$$

$$\rho_{Aluminio} = 2,7 g/cm^3$$

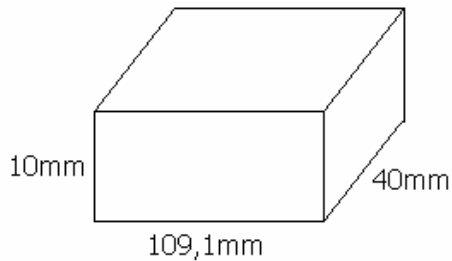
$$m = \rho \times V \Rightarrow (2,7 g/cm^3)(453,25cm^3)$$

$$m = 1223,77 g \cong 1,2Kg$$

$$W_{Balanza} = mg \Rightarrow (1,2Kg)(9,8m/s^2)$$

$$W_{Balanza} = 12N$$

**Figura 30-1.** Cubo Balanza Soporte vástago



$$V = l \times a \times h \Rightarrow (1cm)(10,9cm)(4,0cm)$$

$$V = 43,6cm^3$$

$$m = \rho \times V \Rightarrow (2,7 g/cm^3)(43,6cm^3)$$

$$m = 117,72g \cong 0,117Kg$$

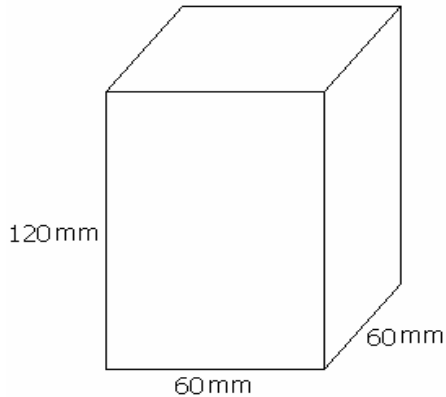
$$W_{Balanza} = mg \Rightarrow (0,117Kg)(9,8m/s^2)$$

$$W_{Balanza} = 1,15N$$

$$W_{Totaldelabalanza} = 12N + 1,15N \Rightarrow W_{Totaldelabalanza} = 13,15N$$

**Soporte Motor 2:** Para esta pieza se procede de igual forma que la balanza y se asume una caja y se calcula su peso, cabe resaltar que el material también es aluminio.

**Figura 31.** Cubo Soporte Motor 2



$$\rho_{Aluminio} = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

$$m = \rho \times V \Rightarrow (2,7 \text{ g/cm}^3)(432 \text{ cm}^3)$$

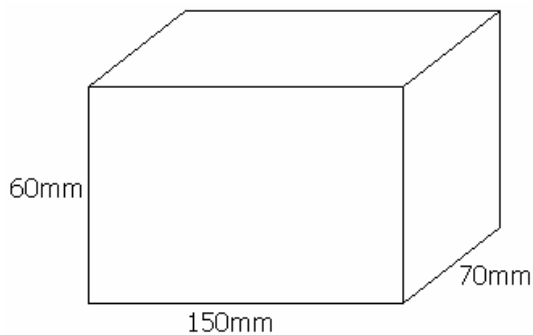
$$m = 1170 \text{ g} \cong 1,17 \text{ Kg}$$

$$W_{SM2} = mg \Rightarrow (1,17 \text{ Kg})(9,8 \text{ m/s}^2)$$

$$W_{SM2} = 11,47 \text{ N}$$

**Soporte de la balanza:** Esta pieza es la encargada de sostener la balanza además de darle un cierto equilibrio para obtener unos resultados más precisos y su material de fabricación también es aluminio.

**Figura 32.** Cubo Soporte de la Balanza



$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = l \times a \times h \Rightarrow (7 \text{ cm})(6 \text{ cm})(15 \text{ cm})$$

$$V = 630 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{Aluminio} = 2,7 \text{ g/cm}^3$$

$$m = \rho \times V \Rightarrow (2,7 \text{ g/cm}^3)(630 \text{ cm}^3)$$

$$m = 1701 \text{ g} \cong 1,70 \text{ Kg}$$

$$W_{SB} = mg \Rightarrow (1,70 \text{ Kg})(9,8 \text{ m/s}^2)$$

$$W_{SB} = 16,67 \text{ N}$$

**Motor 2:** El peso de este motor se encuentra especificado en el data sheet como se puede observar en anexos su peso es de 0,650Kg y al multiplicarlo por la gravedad se obtiene 6,37N.



**Aeromodelo:** Para cada modelo que se probara en dicho sistema se estima un peso no mayor a 500g y al multiplicarlo por la gravedad se obtiene

Una vez calculados todos los pesos que va a soportar el eje que se encuentra en la parte inferior del diseño, se suma el peso de cada uno de los componentes y se obtiene el peso total que va actuar sobre dicho eje.

$$W_{Total} = W_{Balanza} + W_{SM\ 2} + W_{SB} + W_{Motor}$$

**Ecuación 2**  $\rightarrow W_{Total} = 13,15N + 11,47N + 16,67N + 6,37N + 4,9N$

$$W_{Total} = 52,56N$$

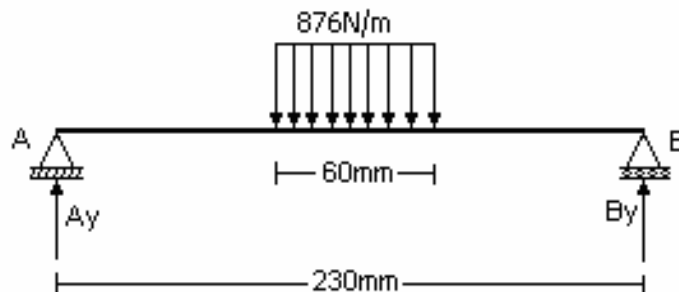
El peso total encontrado es el que se tiene en cuenta para el diseño del eje que soportara la mayor carga es de 52,6N.

**Diseño del eje motor 1:** Debido a la posición horizontal de este eje se hace el análisis de fatiga por flexión y torsión para el respectivo calculo de su diámetro.

Al igual que para el calculo del motor se asume que todos los componentes son bloques para diseñar sobre su caso mas crítico, a continuación se muestra el diagrama de cuerpo libre del eje 1.

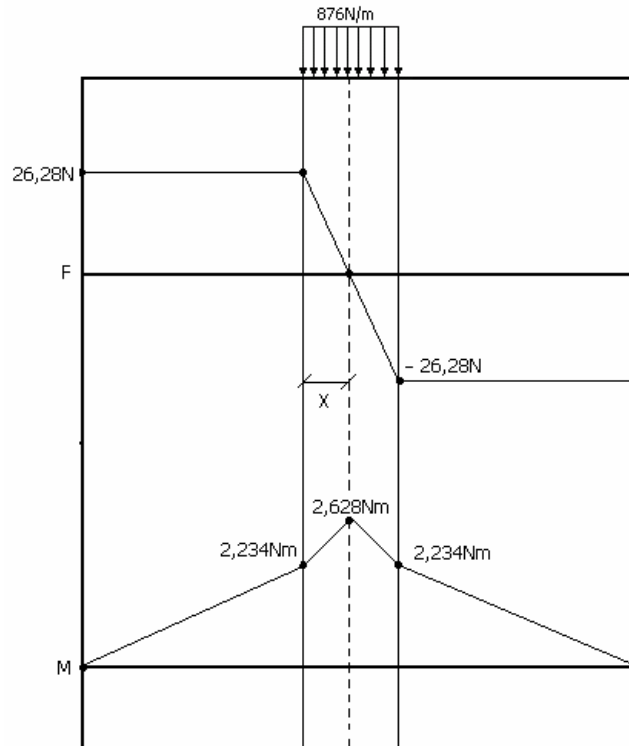
**Ecuación 3**  $\rightarrow F_1 = \frac{52,56N}{0,06m} \Rightarrow F_1 = 876 \frac{N}{m}$

**Figura 33.** Diagrama de cuerpo Libre Eje 1



Teniendo en cuenta los principios de estática se procede con la sumatoria de fuerzas y momentos.

**Figura 34.** Diagrama de fuerza cortante y momento flector



$$\frac{26,28}{X} = \frac{26,28}{0,06 - X}$$

$$X = 0,03$$

$$F_1 = \frac{52,56 N}{0,06 m} \Rightarrow F_1 = 876 \frac{N}{m}$$

$$\sum F_Y = A_Y + B_Y - F_1 * (0,06 m)$$

$$\sum M_A = -(52,56 N) * 0,115 m + B_Y * (0,230 m) = 0$$

$$B_Y = 26,28 N$$

$$A_Y = 52,56 N - 26,28 N \Rightarrow A_Y = 26,28 N$$

Como se observa en la figura 34 la fuerza máxima es de 26,28 N y el momento máximo es 2,628 Nm, procedemos a los siguientes cálculos

### Diseño por flexión del eje 1:

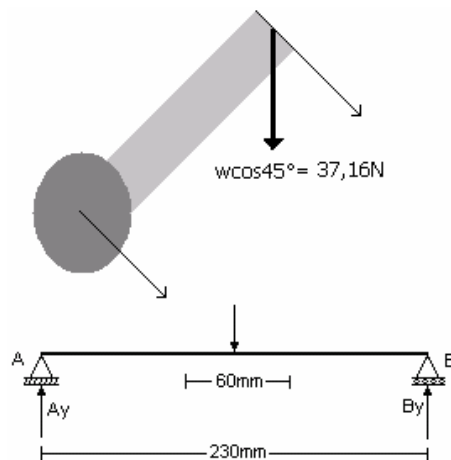
Ecuación 4 →

$$\sigma_{Flexion} = \frac{M_{Max} * C}{I} \Rightarrow \therefore C = \frac{d}{2} \therefore I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$\sigma_{Flexion} = \frac{2,628Nm * \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{64}} \Rightarrow \sigma_{Flexion} = \frac{26,77Nm}{d^3}$$

El grafico 35 muestra a todo el sistema en una posición crítica con todo el peso en la punta.

**Figura 35.** Diagrama de cuerpo Libre Eje 1 a 45°



$$\sum F_Y = A_Y + B_Y - 37,16N = 0$$

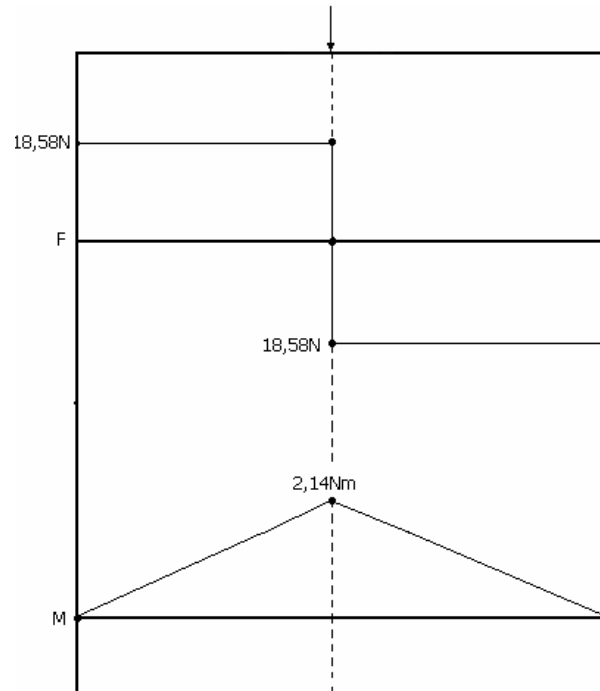
$$\sum M_A = -(37,16N) * 0,115m + B_Y * (0,230m) = 0$$

$$B_Y = 18,58N$$

$$A_Y = 18,58N$$

Una vez calculadas las fuerzas en los puntos A y B se procede a graficar el diagrama de fuerza cortante y momento flector con el fin de obtener el momento máximo para reemplazarlo en la formula de esfuerzo a flexión.

**Figura 36.** Diagrama de fuerza cortante y momento flector a 45°



Como se puede ver en la figura 36, en esta posición determina que el esfuerzo es el mínimo.

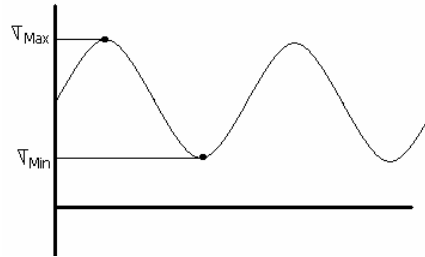
$$\sigma_{Flexion\ minima} = \frac{M_{Min} * C}{I} \Rightarrow \therefore C = \frac{d}{2} \therefore I = \frac{\pi d^4}{64}$$

**Ecuación 5**  $\longrightarrow$

$$\sigma_{Flexion\ minima} = \frac{2,14Nm * \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{64}} \Rightarrow \sigma_{Flexion} = \frac{21,76Nm}{d^3}$$

El comportamiento del sistema es de forma fluctuante como se muestra en la figura 37, ya que este eje constantemente va a estar sintiendo esfuerzos.

**Figura 37.** Comportamiento del sistema a Flexión



**Ecuación 6** →

$$\sigma_{Medio} = \frac{\sigma_{Max} + \sigma_{Min}}{2}$$

$$\sigma_{Medio} = \frac{\frac{26,77Nm}{d^3} + \frac{21,76Nm}{d^3}}{2}$$

$$\sigma_{Medio} = \frac{24,265Nm}{d^3}$$

**Ecuación 7**

$$\sigma_{Alternante} = \frac{\sigma_{Max} - \sigma_{Min}}{2}$$

$$\sigma_{Alternante} = \frac{\frac{26,77Nm}{d^3} - \frac{21,76Nm}{d^3}}{2}$$

$$\sigma_{Alternante} = \frac{2,505Nm}{d^3}$$

El material que se va a utilizar para diseñar el respectivo eje es un acero 1040 Maquinado estirado en frío donde sus propiedades son:

$A=4,51$	$S_{Ultimo} = 586MPa$	$K_{Tamaño} = 1$	$K_{Confiabilidad} = 0,753$
$b=-0,265$	$K_{Tamaño} = 1$	$K_{Carga} = 1$	$K_{Superficie} = 0,833$

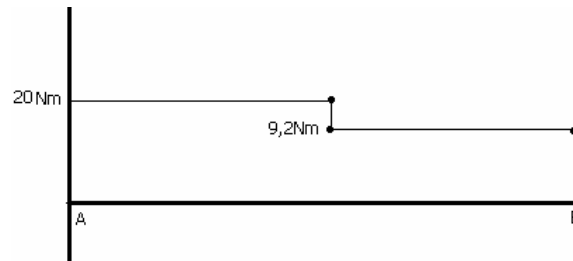
**Diseño por torsión eje 1:**

Este esfuerzo a torsión que se presenta en este eje se debe gracias al torque generado por el motor

<b>Ecuación 8</b>	→	$K_{Superficie} = A(S_{Ultimo})^b$
<b>Ecuación 9</b>	→	$S_e = 586MPa * (0,5) = 292MPa$
		$C_{Gravedad} = 0,29m$
		$T = 37,16N * 0,29m$
		$T = 10,77Nm$

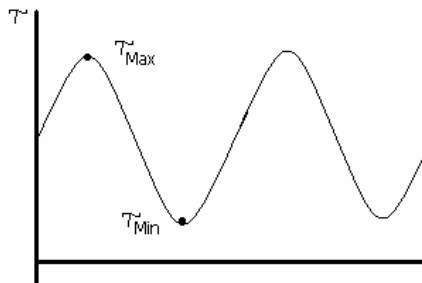
Como se muestra en la figura 38, 20Nm es el tórque nominal del motor 1 y 11 es la resta del Tórque nominal menos el Tórque requerido.

**Figura 38.** Diagrama de Tórque Máximo y Mínimo



**Ecuación 10**  $\rightarrow \tau_{Max} = \frac{T * r}{J} \Rightarrow \frac{20Nm * \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{32}} \Rightarrow \tau_{Max} = \frac{101,86Nm}{d^3}$

**Figura 39.** Comportamiento del sistema a Torsión



$\tau_{Min} = \frac{T * r}{J} \Rightarrow \frac{9,2Nm * \frac{d}{2}}{\frac{\pi d^4}{32}} \Rightarrow \tau_{Min} = \frac{46,85Nm}{d^3}$

**Ecuación 11**

$$\tau_{Medio} = \frac{\tau_{Msx} + \tau_{Min}}{2}$$

$$\tau_{Medio} = \frac{74,36}{d^3} Nm$$

**Ecuación 12**

$$\tau_{Alt} = \frac{\tau_{Msx} - \tau_{Min}}{2}$$

$$\tau_{Alt} = \frac{27,51}{d^3} Nm$$

**Ahora por teoría de distorsión de energía:** Esta teoría establece que el fallo en materiales dúctiles ocurre cuando la energía de distorsión por unidad de volumen del material iguala o excede la energía de distorsión por unidad de volumen del mismo material cuando alcance el límite elástico en el ensayo de tracción. Esta teoría considera la energía asociada con los cambios de forma del material, y es muy adecuada para materiales dúctiles<sup>7</sup>.

**Ecuación 13**  $\longrightarrow \sigma'_{Alt} = (\sigma_{alt}^2 + 3\tau_{XYAlt}^2)^{1/2}$

**Ecuación 14**  $\longrightarrow \sigma'_{Med} = (\sigma_{Med}^2 + 3\tau_{XYMed}^2)^{1/2}$

$$\sigma'_{Alt} = \left( \left( \frac{2,51}{d^3} \right)^2 + 3 \left( \frac{27,51}{d^3} \right)^2 \right)^{1/2} \Rightarrow \sigma'_{Alt} = \frac{47,71 Nm}{d^3}$$

$$\sigma'_{Med} = \left( \left( \frac{24,265}{d^3} \right)^2 + 3 \left( \frac{74,36}{d^3} \right)^2 \right)^{1/2} \Rightarrow \sigma'_{Med} = \frac{131,06 Nm}{d^3}$$

**Ecuación 15**  $\longrightarrow \frac{1}{N} = \frac{\sigma'_{Alt}}{S_e} + \frac{\sigma'_{Med}}{S_{Ult}} \therefore N = 2$

$$\frac{1}{2} = \frac{\frac{47,71 Nm}{d^3}}{183,8 * 10^6 Pa} + \frac{\frac{131,06 Nm}{d^3}}{586 * 10^6 Pa} \Rightarrow \underline{\underline{d \geq 1cm}}$$

Para el eje que soporta toda la estructura sus dimensiones deben ser mayores o iguales a 1cm

Ahora vamos a una rectificación de las medidas reemplazando esta dimensión en la ecuación 16:

<sup>7</sup> Análisis y optimización por elementos finitos para cualquier sistema CAD [en línea] Bilbao España: Iberisa, 2001. [consultado 11 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/soporte\\_plastico.htm](http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/soporte_plastico.htm)

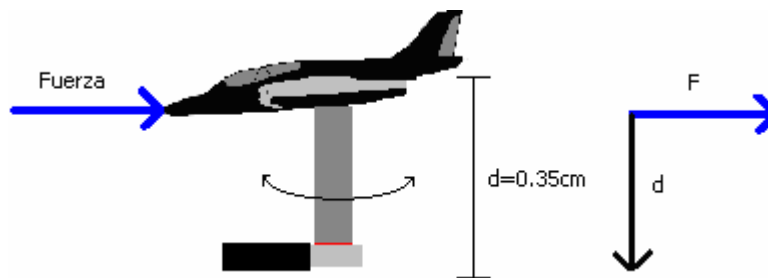
**Ecuación 16**

$$\begin{aligned} \longrightarrow K_{\text{Tamaño}} &= (1.189)d^{-0.097} \Rightarrow K_{\text{Tamaño}} = 0.84 \\ S_e &= 183.8 * (0.84) \Rightarrow S_e = 153.72 \text{ MPa} \\ \frac{1}{N} &= \frac{\sigma'_{Alt}}{S_e} + \frac{\sigma'_{Med}}{S_{Ult}} \therefore N = 2 \\ \frac{1}{2} &= \frac{\frac{47,71 \text{ Nm}}{d^3}}{153.72 * 10^6 \text{ Pa}} + \frac{\frac{131,06 \text{ Nm}}{d^3}}{586 * 10^6 \text{ Pa}} \Rightarrow \underline{\underline{d \geq 0.98 \text{ cm}}} \end{aligned}$$

**Calculo del Eje 2 que actúa como columna y como viga:** A continuación se realizarán los respectivos cálculos para determinar el flujo actúa como carga axial del viento.

Ya conociendo la velocidad del viento dentro del túnel, de 30m/s, las dimensiones de este, la densidad del aire en el laboratorio es de 1.28Kg/m<sup>3</sup>, El tamaño de los aeromodelos Aprox. 20x5cm actúa como una placa, se procede a hallar el flujo másico del viento, la fuerza que ejerce este en el aeromodelo.

**Figura 40.** Grafico de fuerzas en X



Por fluidos se sabe que:

**Ecuación 17**  $\longrightarrow Q = A * Vel \Rightarrow \dot{m} = \rho * A * Vel \Rightarrow \dot{m} = \rho * Q$

**Ecuación 18**  $\longrightarrow F = \dot{m} * Vel$



Donde:

$$Q = A * Vel \Rightarrow Q = 0.01m^2 * 30 \frac{m}{s} \Rightarrow Q = 0.3 \frac{m^3}{s}$$

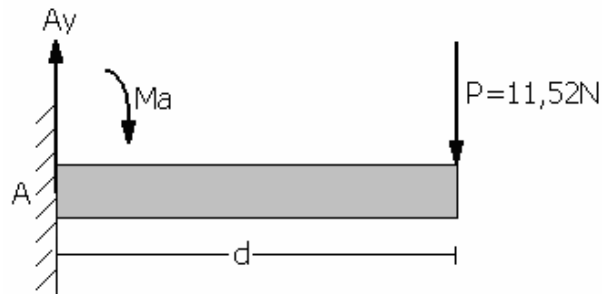
$$\text{Ecuación 19} \longrightarrow \dot{m} = \rho * Q \Rightarrow 1.28 \frac{Kg}{m^3} * 0.3 \frac{m^3}{s} \Rightarrow \dot{m} = 0.384 \frac{Kg}{s}$$

$$F = \dot{m} * Vel \Rightarrow 0.384 \frac{Kg}{s} * 30 \frac{m}{s} \Rightarrow F = 11.52N$$

La fuerza  $P=11,52N$  que hace que este eje actúe como viga es la fuerza del viento generada en el túnel.

Para el diseño de este eje se tiene en cuenta dos casos para ser analizado, ya que actúa como viga y como columna, a continuación se describen los dos procesos.

**Figura 41.** Análisis tipo Viga



Como Viga:

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 20} \longrightarrow M_{\max} &= P \times d \\ M_{\max} &= (11,52N)(0,05m) \\ M_{\max} &= 0,576Nm \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 21} \longrightarrow \sigma_{flexion} &= \frac{M_{\max} \times d / 2}{\frac{\pi d^4}{64}} = \frac{5,87}{d^3} \\ \sigma_{flexion} &= \frac{5,87}{d^3} \end{aligned}$$

Se sabe que esfuerzo a flexión también es igual a la relación del límite de fluencia del material sobre el factor de seguridad con que se quiere diseñar dicho elemento.

Para este caso se asume un factor de seguridad de 3 y el material con que se quieren diseñar los ejes es un acero 1040 maquinado estirado en frío.

$$\text{Ecuación 22} \longrightarrow \sigma_{flexion} = \frac{\sigma_y}{FS} = \frac{490MPa}{3}$$

$$\sigma_{flexion} = 163,3 \times 10^6 Pa$$

Una vez calculado el esfuerzo a flexión con cada una de las ecuaciones 21 y 22 se igualan y se despeja el diámetro.

$$\frac{5,87Nm}{d^3} = 163,33 \times 10^6 Pa$$

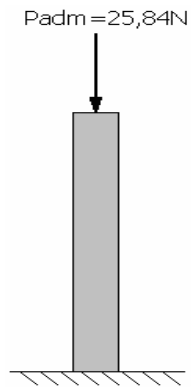
$$d = \sqrt[3]{\frac{5,87Nm}{163,33 \times 10^6 Pa}} = 3,30 \times 10^{-3} m$$

$$d = 3,30mm$$

El diámetro que se seleccione debe ser igual o mayor a 3,30mm. Esta claro precisar que este diámetro sirve cuando el eje actúa como viga.

Como Columna:

**Figura 42.** Análisis tipo Columna



Para proceder con este cálculo es necesario tener en cuenta la razón de esbeltez, para este caso se sugiere un factor de seguridad de 2.

$$\begin{aligned} P_{critica} &= P_{adm} \times FS \\ \text{Ecuación 23} \longrightarrow P_{critica} &= (25,84N)(2) \\ P_{critica} &= 51,68N \end{aligned}$$

Para este análisis se tiene en cuenta la formula de la columna de Euler

$$\text{Ecuación 24} \longrightarrow P_{critica} = \frac{\pi^2 EI}{L_{eq}^2}$$

Normalizando esta ecuación en función del área de la sección transversal de la columna, se obtiene la expresión para la carga crítica unitaria.

$$\text{Ecuación 25} \longrightarrow \frac{P_{critica}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\frac{L_{eq}^2}{\rho^2}}$$

Donde  $p$  es el radio de curvatura del eje y  $L_{eq}$  es la longitud equivalente de la columna y su relación es la que se conoce como radio de esbeltez.

$$\text{Ecuación 26} \longrightarrow Sr = \frac{L_{eq}}{\rho}$$

$$\sigma_y = \frac{P_{critica}}{A}$$

$$\sigma_y = \frac{\pi^2 E}{\frac{L_{eq}^2}{\rho^2}} \Rightarrow \left( \frac{L_{eq}}{\rho} \right)^2 = \frac{\pi^2 E}{\sigma_y} = \frac{\pi^2 (200 \times 10^9 Pa)}{490 \times 10^6 Pa}$$

$$\left( \frac{L_{eq}}{\rho} \right) = \sqrt{\frac{\pi^2 (200 \times 10^9 Pa)}{490 \times 10^6 Pa}}$$

$$\frac{L_{eq}}{\rho} = 63,87 \quad \text{Relación de Esbeltez.}$$

Una vez calculada la relación de esbeltez la remplazamos en la ecuación de carga crítica unitaria ecuación 25.

$$\frac{P_{critica}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\frac{L_{eq}^2}{\rho^2}} \Rightarrow 51,68 N = \frac{\pi^2 \times (200 \times 10^9 Pa) \times \frac{\pi d^4}{64}}{L_{eq}}$$

Hay que tener en cuenta que la longitud equivalente cuando la columna esta empotrada en un punto es igual a 2 veces su longitud real.

$$\text{Ecuación 27} \longrightarrow L_{eq} = 2L$$

Entonces:

$$51,68N = \frac{\pi^2 \times (200 \times 10^9 Pa) \times \frac{\pi d^4}{64}}{2(0,05m)} = 2,69 \times 10^{-3} m$$
$$d = 2,69mm$$

Se observa que el diámetro del eje fue analizado mediante dos casos de estudio, cuando actúa como viga y como columna y se observa que los diámetros calculados en ambos casos es aproximado por lo cual una buena decisión sería diseñar dicho eje con un diámetro mayor a 2,69mm, por mayor seguridad y confiabilidad se diseñara el eje igual o mayor a 1Cm.

**8.1.3 Funcionalidad y medidas de las partes. Balanza y soporte:** La balanza tiene un diseño tal de que soporte grandes cargas y no influya en la toma de datos de las diferentes fuerzas de sustentación y elevación, el vástago mide 35Cm de largo y 3.5Cm de espesor y el soporte del vástago mide 4Cm ancho, 10Cm de largo y 1.5Cm de espesor esta balanza esta hecha de aluminio. Figura 69 (parte 11)

**Soportes de motores:** Es la encargadas de dar cuerpo al modelo y sujetar lo motores, balanzas, sensores, teniendo en cuenta la forma y medidas de estos, además también que no obstruyeran ningún movimiento, toma de datos de los elemento ya mencionados. Figura 69 (partes 2 y 4)

## 8.2 DOCUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

Este sistema va a estar alimentada por dos fuentes una dual a -12 y 12 voltios para los sensores, galgas, módulos, drivers y la otra fuente fija 24VDC de alto amperaje para los motores.

Se utilizaran dos fuentes a razón de que los motores generan ruidos o sobre impulsos de corriente los cuales al conectar todos los implementos electrónicos a una misma fuente puede causar perdida en la toma de datos, o que dañen o los dispositivos electrónicos.

### 8.2.1 Tipo de Alimentación

- **Sensores:** Los encoders absolutos poseen una alimentación de 5,5 voltios. Y su salida es lineal a la posición.
- **Actuadores:** Se alimentan con 24 voltios y la corriente es lineal al torque como se muestra en las figura 21 y 23. curva característica.
- **Galgas:** Cada una de estas se alimenta con 10 voltios y la salida que entregan viene dada en milivoltios de aquí nace la necesidad de implementar el módulo de instrumentación.
- **Módulo:** Se alimenta de 5 – 15 voltios y consumo de energía es de 120mA.
- **Driver:** Los elementos utilizados tienen un consumo de 5 y 12 voltios.

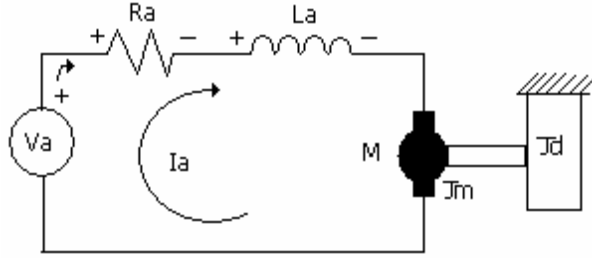
### 8.2.2 Elementos utilizados en los drivers:

- 4 Mosfet tipo N (IRF 9530)
- 4 Mosfet tipo P (IRF 540)
- Resistencias 10K, 1k
- 8 Diodos (1N4001)
- Optoacoplador (NPN)

**Ver anexo E.**

### 8.3 DOCUMENTACIÓN DEL SOFTWARE

Para el diseño del respectivo controlador se tuvo en cuenta como modelos de sistema dinámicos como se muestra a continuación:



**Figura 43.** Sistema Electromecánico del Motor

**Ecuación 28**  $\longrightarrow L_a \frac{dI_a}{dt} + RI_a + e_b = V_a(t) \therefore e_b = K_e \dot{\theta} \Rightarrow L_a \frac{dI_a}{dt} + RI_a + K_e \dot{\theta} = V_a(t)$

**Ecuación 29**  $\longrightarrow J_m \ddot{\theta} + b \dot{\theta} - T_m = -T_{MASA} \therefore T_m = K_t I_a \therefore T_{MASA} = J_b \ddot{\theta}$   
 $\Rightarrow J_m \ddot{\theta} + J_b \ddot{\theta} + b \dot{\theta} = K_t I_a$

Aplicando Laplace se tiene:

**Ecuación 30**  $\longrightarrow (L_a S + R)I_a(S) + K_e S\theta(S) = V_a(S)$

**Ecuación 31**  $\longrightarrow (J_m + J_b)S^2\theta(S) + bS\theta(S) = K_t I_a(S)$

De la Ecuación 31 se despeja  $I_a(S)$

$$I_a(S) = \frac{(J_m + J_b)S^2\theta(S) + bS\theta(S)}{K_t}$$

Reemplazando en ecuación 30

$$V_a(S) = (L_a S + R) \frac{(J_m + J_b) S^2 \theta(S) + b S \theta(S)}{K_t} + K_e S \theta(S)$$

$$\frac{V_a(S)}{\theta(S)} = \frac{(L_a S + R)(J_m + J_b) S^2 + b S + K_e K_t S}{K_t}$$

**Ecuación 32**  $\longrightarrow \frac{\theta(S)}{V_a(S)} = \frac{K_t}{(L_a S + R)(J_m + J_b) S^2 + b S + K_e K_t S}$

$\frac{\theta(S)}{V_a(S)}$  Es la función de transferencia correspondiente de cada motor, donde  $L_a$ , es la inductancia,  $R_a$  la resistencia y  $J_m$  el momento de inercia de los motores,  $b$  es el coeficiente de fricción del rodamiento del motor pero como están pequeña se desprecia, esto solo se hace para pruebas de diseño;  $K_t$  es la relación de la Corriente Vs Tórque del motor o sea la pendiente de la recta Figura 21 y 23. *Curva Característica motor Valeo.*

**Ecuación 33**  $\longrightarrow K_t = \frac{T}{I} \Rightarrow \left[ \frac{Nm}{A} \right]$

Teniendo en cuenta que el  $K_e$  es la relación entre el voltaje consumidos sobre la velocidad angular del motor, estos datos se encuentran en el data sheet,

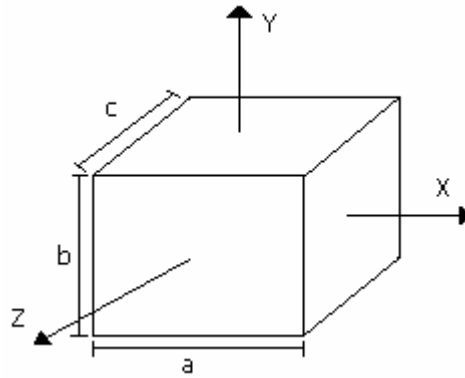
**Ecuación 34**  $\longrightarrow K_e = \frac{V}{\theta} \Rightarrow \left[ \frac{Volt}{RPM} \right]$

Todos los parámetros mencionados se encuentran en el data sheet de su respectivo motor.

Ahora tenemos un momento de inercia  $J_b$ , este momento de inercia es el del cuerpo de la balanza, para calcular este momento de inercia se toma la masa como cubos para hacer un mejor diseño; Se sabe que:



**Figura 44.** Momentos de Inercia



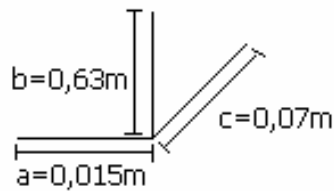
**Ecuación 35**  $\longrightarrow J_x = \frac{m(b^2 + c^2)}{12}$

**Ecuación 36**  $\longrightarrow J_y = \frac{m(c^2 + a^2)}{12}$

**Ecuación 37**  $\longrightarrow J_z = \frac{mb^2}{12}$

Según los movimientos ejecutados por los el primer motor se adecua el de  $J_z$  ecuación 37 de aquí partiremos, sabemos que la masa que tiene que soportar el primer motor es de 5,36Kg y las medidas son las que se muestran en la figura 45.

**Figura 45.** Momentos de Inercia en  $J_z$



$$J_z = \frac{mb^2}{12} \Rightarrow J_z = \frac{5,36Kg(0,63m^2)}{12} \Rightarrow J_z = 0,177Kg * m^2$$

Ahora ya obtenidos todos los datos del motor y la masa se procede a reemplazar los valores en la función de transferencia que se encuentran en la data sheet:

$$L_1 = 4,2 \text{ mH}$$

$$R_1 = 900 \text{ m } \Omega$$

$$J_{m1} = 520 * 10^{-6} \text{ Kgm}^2$$

$$K_{t1} = 3,43$$

$$K_{e1} = 0,88$$

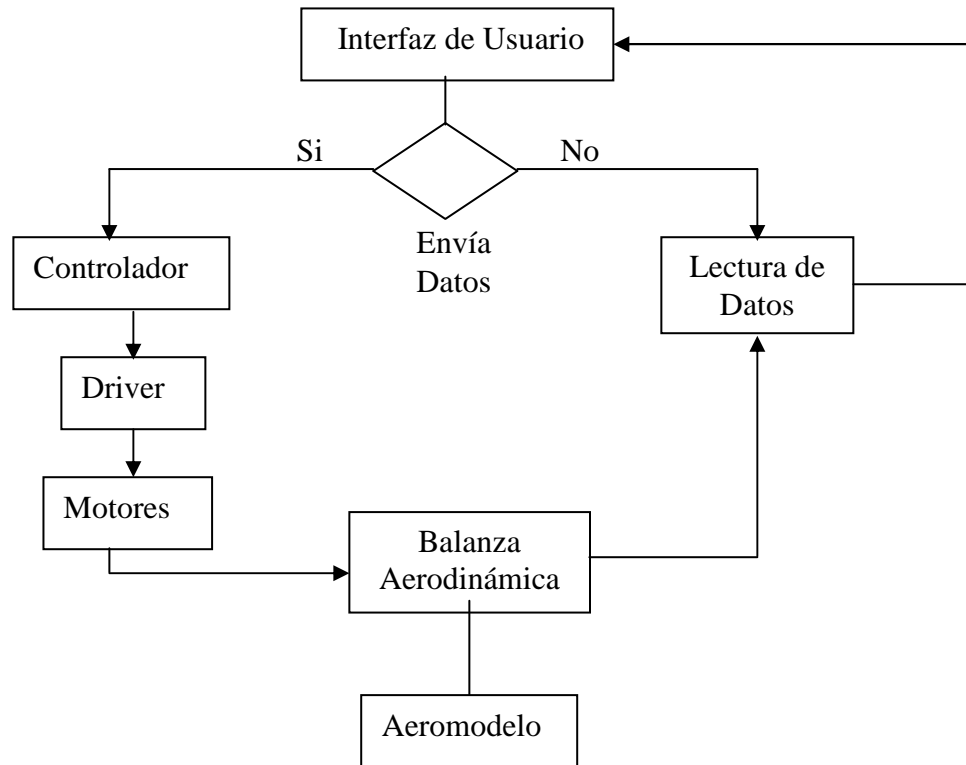
Ahora de la ecuación 32 se reemplazan los valores:

$$\frac{\theta(S)}{V_a(S)} = \frac{K_{t1}}{(L_{a1}S + R)(J_{m1} + J_{b1})S^2 + bS + K_{e1}K_{t1}S}$$

$$\frac{\theta(S)}{V_a(S)} = \frac{3,43}{7,476 * 10^{-4} S^3 + 0,160 S^2 + 3,02 S}$$

Los controladores a diseñar deben de tener una sintaxis tal de que sea un control en lazo cerrado como se muestra en el diagrama de bloques:

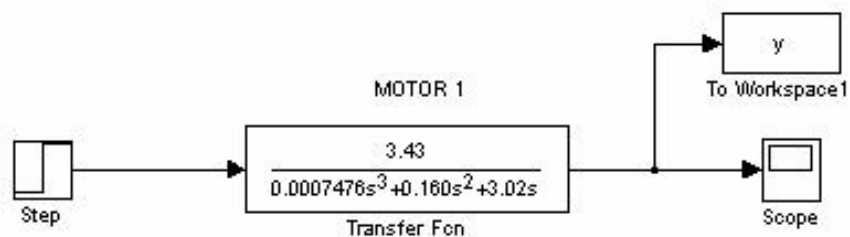
**Figura 46.** Diagrama de bloques de control



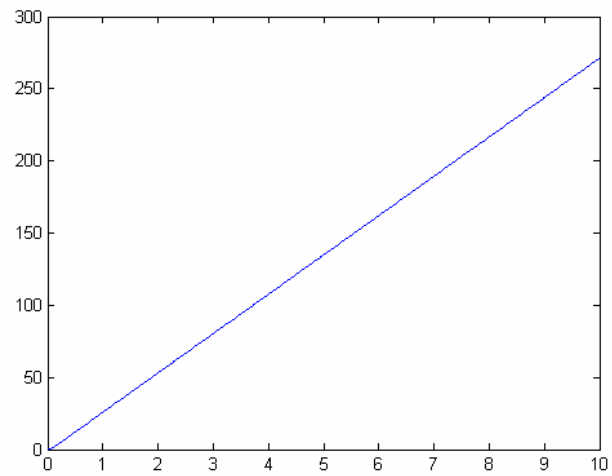
Teniendo la función de transferencia con los datos reales del motor se procede al respectivo diseño del controlador:

**8.3.1 Diseño de Controlador para el Motor 1:** La función de transferencia tiene un comportamiento inestable en lazo abierto como se muestra en la figura 48, debido a que carece de un término independiente como se puede apreciar en la figura 47. Al cerrar el lazo de control, la señal se estabiliza pero su tiempo no es muy óptimo para la aplicación requerida.

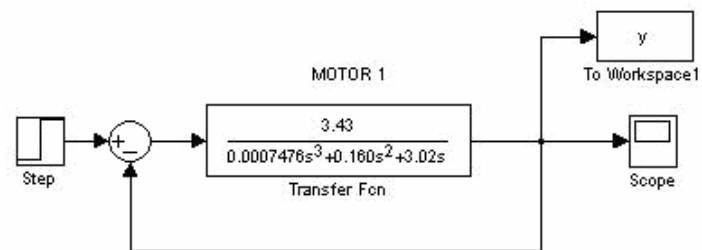
**Figura 47.** Función de Transferencia en lazo abierto del motor 1.



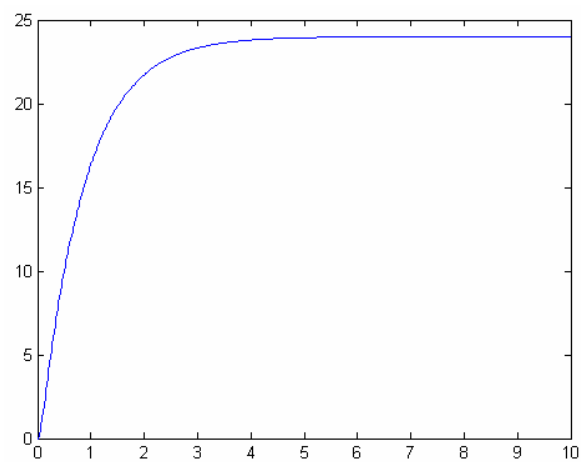
**Figura 48.** Comportamiento en lazo abierto del motor 1.



**Figura 49.** Función de Transferencia del Motor 1 en Lazo Cerrado



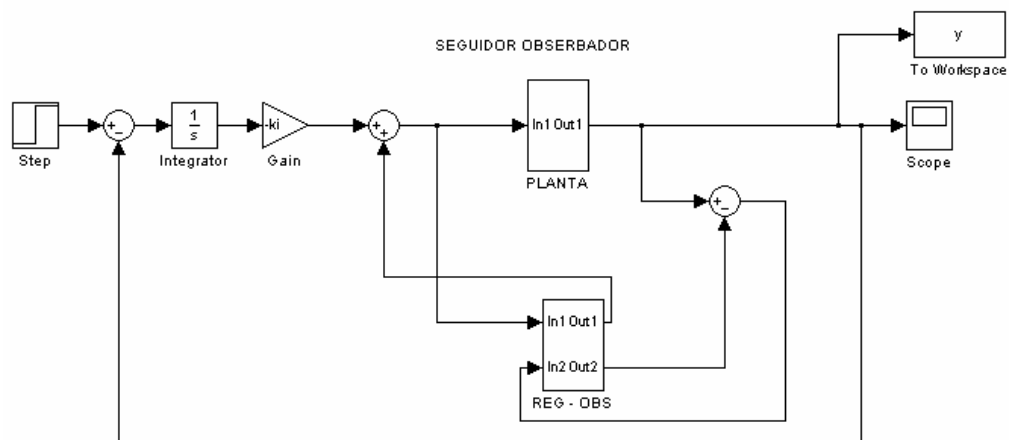
**Figura 50.** Comportamiento en lazo cerrado del motor 1.



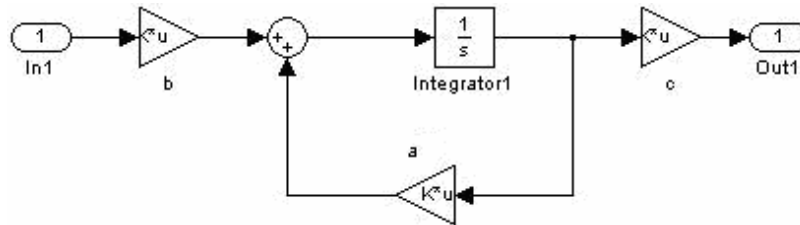
Se observa el comportamiento en lazo cerrado de la función de transferencia del motor 1 figura 50, un comportamiento estable, sin error de estado estacionario y con un tiempo de estabilización de 6 seg. aproximadamente, entonces lo que se quiere hacer es disminuir el tiempo de estabilización y tener un mejor control sobre cada uno de los polos de nuestro sistema, lo ideal es desarrollar un control por realimentación de estados (regulador-observador), pero en la simulación se puede apreciar, que el comportamiento del sistema reduce su tiempo de estabilización como se quiere; pero ocasiona un error de estado estacionario muy grande como se muestra en la figura 54, hay que tener en cuenta que la señal de referencia es 24 voltios y el tiempo en que se estabiliza el sistema es de 2 segundos, entonces por lo cual es mas conveniente diseñar un (seguidor-observador) el cual no cambia el tiempo de estabilización pero si elimina el error de estado estacionario, figura 55. Este controlador además de seguir la referencia permite estimar los estados durante todo el proceso de control.

Las figuras 51, 52, 53, nos muestra el respectivo diagrama de bloques del controlador (seguidor-observador) realizado en Simulink de MATLAB.

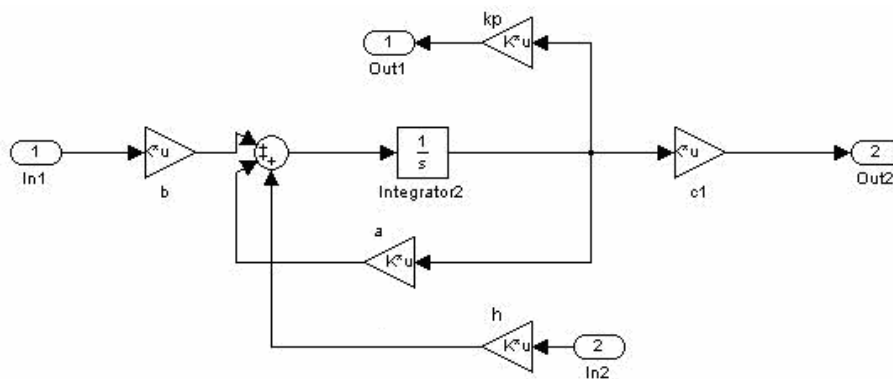
**Figura 51.** Controlador con un Seguidor Observador para el motor 1



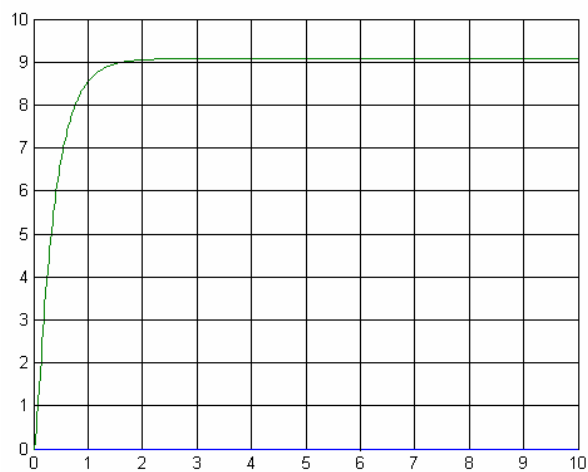
**Figura 52.** Planta en Lazo Abierto con Realimentación de Estados



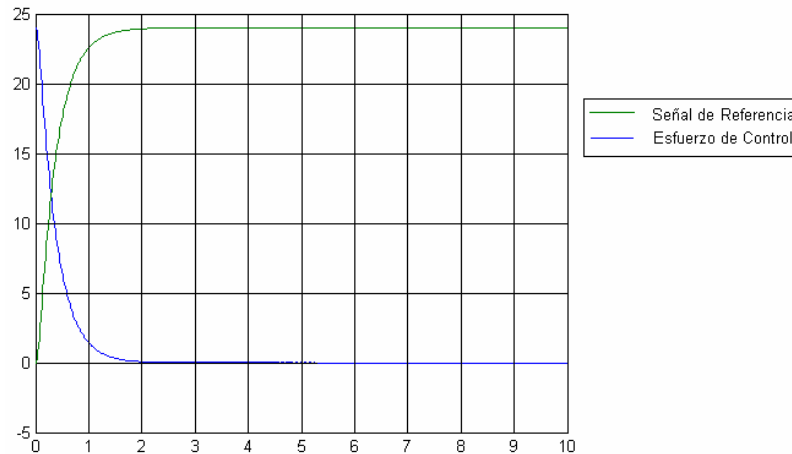
**Figura 53.** Controlador de la Planta (Seguidor - Observador)



**Figura 54.** Comportamiento de la señal del motor 1 después de implementar el (Regulador - Observador)



**Figura 55.** Comportamiento de la señal del Motor 1 después de implementar el (Seguidor - Observador)



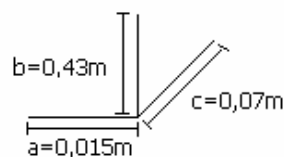
El controlador se implementó con el fin de mejorar el tiempo de estabilización y volver más estable el comportamiento del sistema al alejar hacia la izquierda el polo localizado en cero.

Como son dos motores se procede con los mismos pasos que se hicieron para diseñar el controlador del motor 1.

**Ver Anexo L**

**8.3.2 Diseño de Controlador para el Motor 2:** Retomando los momentos de inercia, esta vez el motor ejecuta un movimiento diferente, este se hace sobre el eje Y como se muestra en la figura 53 y ecuación 29, además la masa que soporta este es diferente ahora es de 1,22Kg

**Figura 56.** Momentos de Inercia en Jy



$$J_y = \frac{m(c^2 + a^2)}{12} \Rightarrow J_y = \frac{1,22Kg((0,07m)^2 + (0,15m)^2)}{12} = J_y = 2,78 * 10^{-3} Kg * m^2$$

Ahora los datos completos son:

$$L_2 = 0,6mH$$

$$R_2 = 562m\Omega$$

$$J_{m2} = 13 * 10^{-6} Kg m^2$$

$$J_{b2} = 2,78 * 10^{-3} Kg m^2$$

$$K_{t2} = 0,83$$

$$K_{e2} = 0,114$$

$$\frac{\theta(S)}{V_a(S)} = \frac{K_{t2}}{(L_{a2}S + R_2)(J_{m2} + J_{b2})S^2 + bS + K_{e2}K_{t2}S}$$

$$\frac{\theta(S)}{V_a(S)} = \frac{0,83}{1,68 * 10^{-6} S^3 + 1,57 * 10^{-3} S^2 + 0,095S}$$

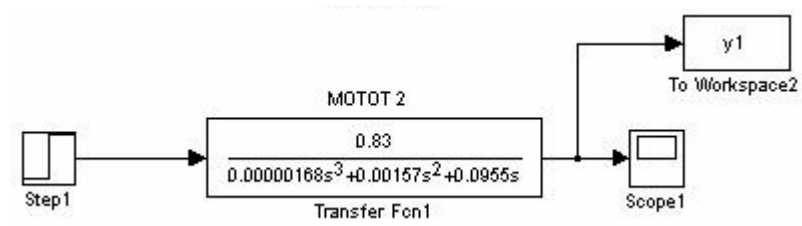
Teniendo la función de transferencia con los datos reales del motor se procede al respectivo diseño del controlador.

El comportamiento de este motor según la función de transferencia en lazo cerrado es adecuado sin ningún tipo de inconveniente, esto se debe al comportamiento optimo del mismo, se estabiliza de manera muy rápida de 1 Segundo aproximadamente y sin error de estado estacionario o algún sobre impulso como se muestra en la figura 60, lo cual aparentemente no necesita de ningún tipo de controlador; pero como son modelos aproximados al del sistema real, permiten una señal de corrección al modelo de la planta para que esta tenga en cuenta los parámetros desconocidos de la planta real.

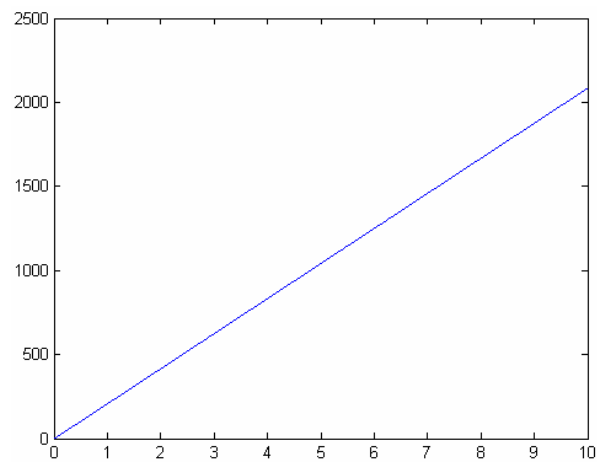
Como se puede notar en la función de transferencia del motor 2, no tiene un termino independiente, lo cual seria recomendable realizar un controlador (regulador-observador) pero el comportamiento de este en el sistema tiene un error de estado estacionario demasiado grande como se muestra en la figura 64 este controlador genera que no siga la referencia dando valores de error muy grandes, por lo cual se toma la decisión de implementar un (Seguidor - Observador).



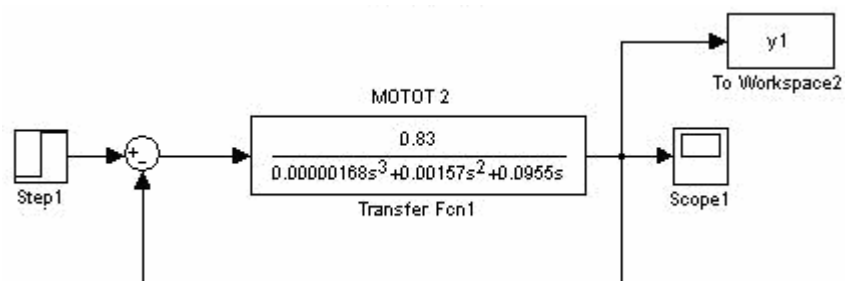
**Figura 57.** Función de Transferencia en lazo Abierto del motor 2.



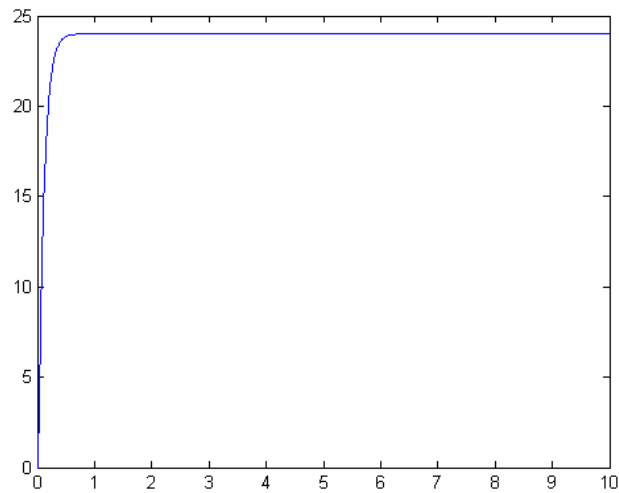
**Figura 58.** Comportamiento en lazo abierto del motor 2.



**Figura 59.** Función de Transferencia en Lazo Cerrado

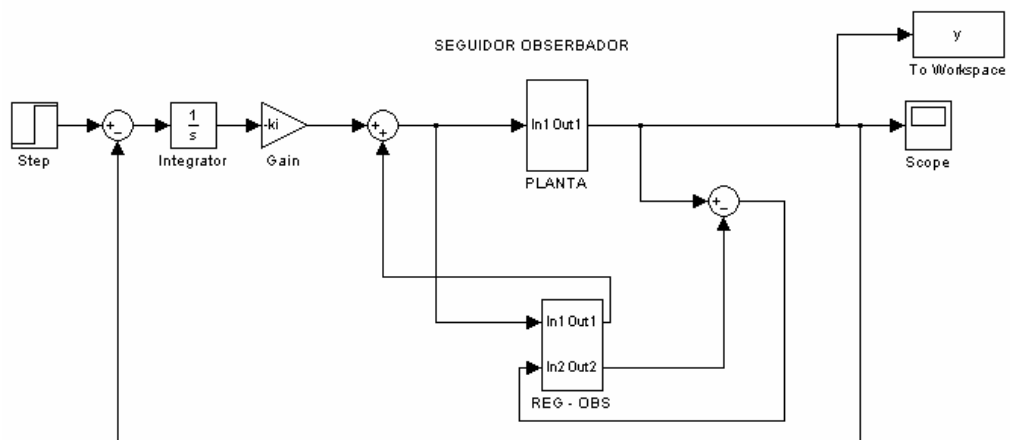


**Figura 60.** Comportamiento en lazo cerrado del motor 2.

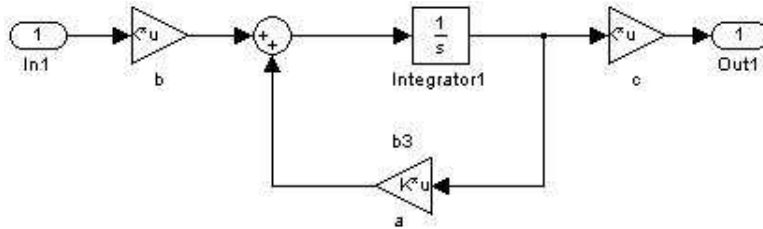


Pero para un mejor control, siguiendo el comportamiento de diseño un controlador seguidor-observador.

**Figura 61.** Diagrama de Bloques del Controlador del Motor2

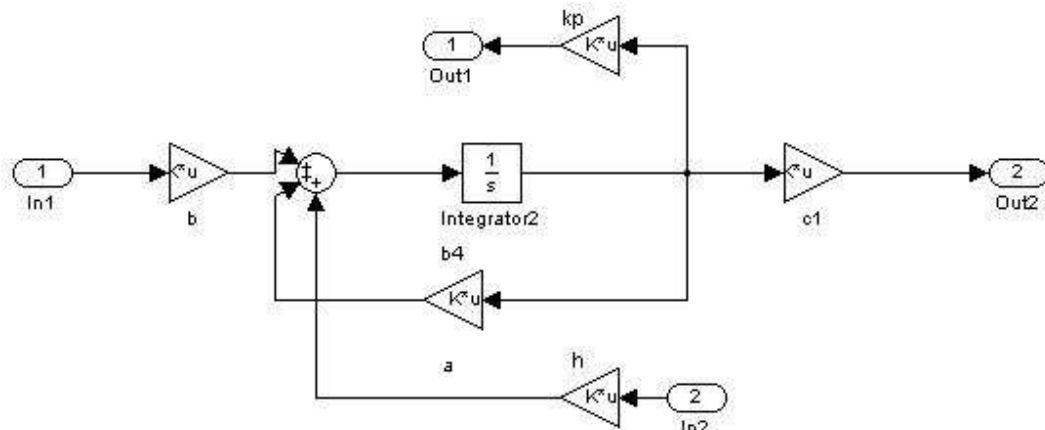


**Figura 62.** Planta Lazo Abierto del Motor 2 en Variables de Estado

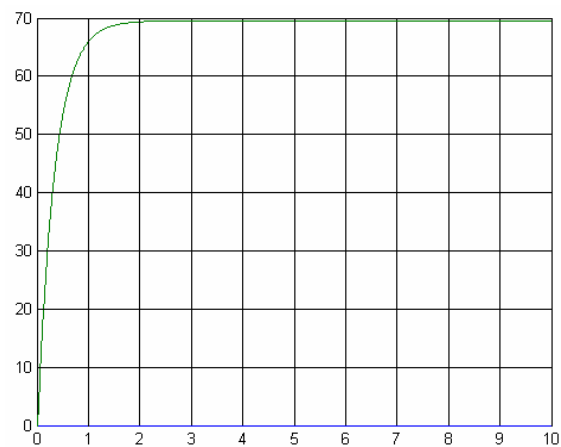


**Ver Anexo L.**

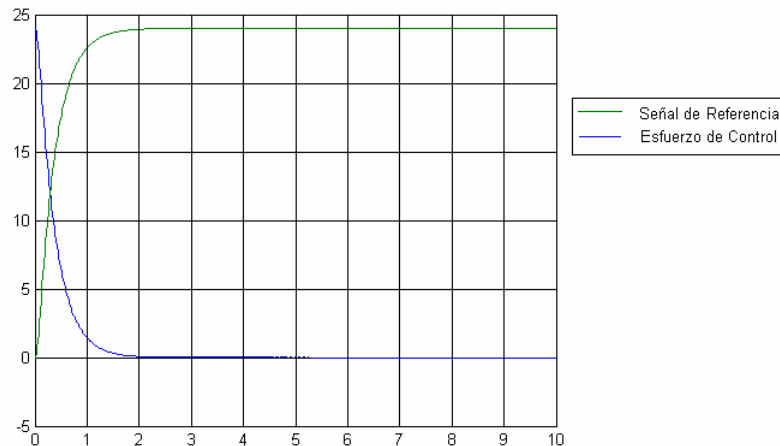
**Figura 63.** Controlador Motor 2 (Regulador - Observador)



**Figura 64.** Comportamiento de la señal del motor 2 después de implementar el (Regulador - Observador)



**Figura 65.** Señal Controlada del motor 2 después de implementar el (Seguidor-Observador)



Se puede apreciar que los comportamientos tanto de la señal de la función de transferencia en lazo cerrado, como la señal de la señal controlada son similares, entonces queda a decisión de los diseñadores elegir la técnica de control a utilizar, la ventaja de implementar el controlador radica en que se puede volver más estable el sistema al correr hacia la izquierda el polo que se encuentra en cero.

## 8.4 INTERFAZ DE USUARIO

A continuación se mostrara la interfaz realizada en Matlab, la pantalla principal consta de varias cajas de texto las cuales nos mostraran en tiempo real la posición actual, la temperatura, presión y velocidad del viento dentro del túnel, y lo mas importante el control de posicionamiento de la balanza como se muestran en la figura 59; también posee varios botones, los cuales no lleven a diferentes ventanas como ver las fuerzas y momentos figura 60 y ver las diferentes graficas como son, la fuerza de sustentación figura 61, resistencia del viento y fuerza lateral todo comparado con ángulo de ataque, que el usuario proporciona entre los rangos de  $-45^{\circ}$  a  $45^{\circ}$ .

**Figura 66.** Interfaz pagina principal

CONTROL\_DE\_POSICION\_ANGULAR

PANEL DE CONTROL TUNEL DE VIENTO EMAVI

Posicion Actual

Digite la posicion deseada (-45° a 45°) °

Temperatura °C

Presion KPa

Velocidad de Aire m/Seg

Visualizar Fuerzas

Ver Grafico 1

Ver Grafico 2

Ver Grafico 3

Salir

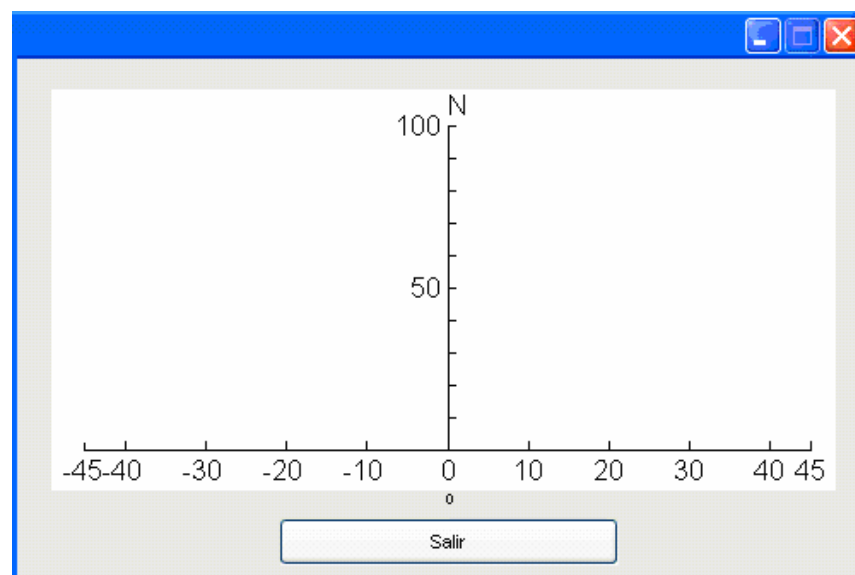
Como se necesita es analizar los diferentes momentos y fuerzas que se ejecutan este se mostrara en la siguiente pantalla que se desplegara al presionar el botón de la Interfaz Principal “Visualizar Fuerzas”.

**Figura 67.** Muestreo de Fuerzas y Momentos

The screenshot shows a software window with a blue title bar and standard Windows window controls (minimize, maximize, close). The main area is titled "Fuerzas" and contains six input fields arranged in a 3x2 grid. The labels for the fields are: "Fuerza de Sustentacion" (Lift Force), "Momento de Guiñada" (Yaw Moment), "Fuerza Lateral" (Lateral Force), "Momento de Alabeo" (Roll Moment), "Fuerza de Arrastre" (Drag Force), and "Momento de Cabeceo" (Pitch Moment). Each label is positioned above its corresponding empty rectangular input box.

Las diferentes graficas que se necesitan analizar se muestra en la figura 68, donde en el eje X se encuentra la posición en grados dados por el usuario y en el eje Y, la fuerza que efectuada por viento sobre el aeromodelo ubicado en la balanza.

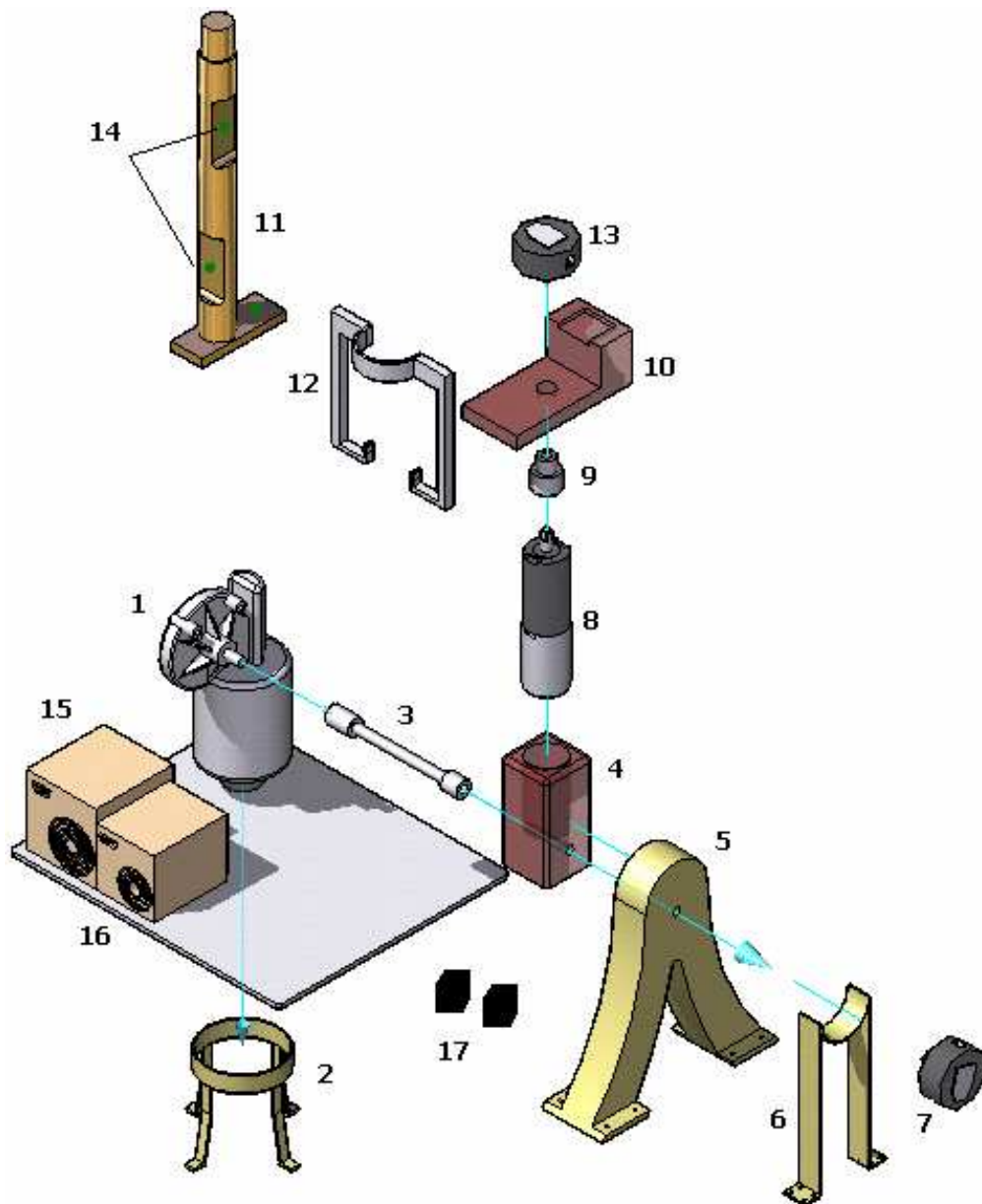
**Figura 68.** Graficas para análisis de fuerzas



## 8.5 LISTA DE PARTES

Esta parte del diseño consta de una imagen explosionada del diseño general de la máquina donde se enumeran y se les da un código a cada una de las piezas que conforman la máquina, como se puede observar en la figura 69.

**Figura 69.** Vista explosionada



**Tabla 9.** Tabla de partes.

ITEM	PIEZA	DESCRIPCION
1	Motor 1	Motorreductor Marca Valeo serie 402826
2	Soporte de motor 1	Pieza Propia
3	Eje del motor 1	Diseño Propio
4	Soporte de motor 2	Pieza Propia
5	Soporte de eje Principal	Diseño Propio
6	Soporte de Encoder 1	Pieza Propia
7	Encoder 1	Sensor de posición Inteligente A2 USDigital
8	Motor 2	Motorreductor Marca Valeo serie 404722
9	Eje de Motor 2	Diseño Propio
10	Soporte guía Balanza	Pieza Propia
11	Balanza Aerodinámica	Pieza Propia
12	Doporte del Encoger 2	Pieza Propia
13	Encoder 2	Sensor de posición Inteligente A2 USDigital
14	Galgas Extensiométricas	Galgas Unidireccionales 120 Ohms SG-6/120 LY13
15	Fuente de los Motores	Fuente 24 VDC Alto Amperaje
16	Fuente de sistemas electrónicos	Fuente Dual Sencilla 12V y -12V
17	Módulos Para la Instrumentación de la Galgas	DMD-465 Amplificación e instrumentación para 6 galgas



## 9. PROTOTIPADO

El proceso de prototipado se llevo a cabo con los siguientes propósitos:

**Comunicación:** Realizar el diseño utilizando herramientas computacionales 3D para observar la distribución física de los diferentes componentes o partes del producto, revisando las interacciones espaciales que se pueden presentar. Observar la apariencia final posible del producto.

**Aprendizaje:** Observar la funcionalidad y determinar los diferentes problemas que puedan presentarse por la interacción de los subconjuntos.

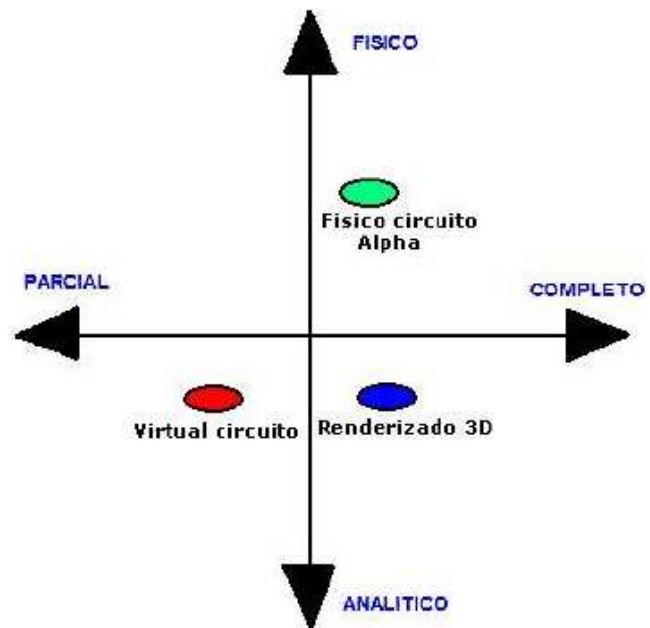
**Integración:** Integrar los diferentes subsistemas para verificar la congruencia de los mismos y los diversos mecanismos de acople entre ellos para que su funcionamiento sea el mejor posible y poder detectar interacciones incidentales y/o no previstas dentro del plan de desarrollo del dispositivo.

**Tipo de Prototipo a Utilizar y Técnica de Prototipado:** Para esta etapa del proceso de diseño se utilizaron tres prototipos: Un prototipo virtual del circuito electrónico de los driver que se elaboró con el fin de mostrar el funcionamiento de los motores, para esto se realizo una serie de pruebas en un software de simulación de circuitos electrónicos llamado *Proteus*.

**Ver anexo E.**

También se elaboró utilizando *Solid Edge* un renderizado del diseño completo del dispositivo, que permite analizar la distribución espacial y geométrica (Layout) de los diferentes subsistemas que conformaran el producto final.

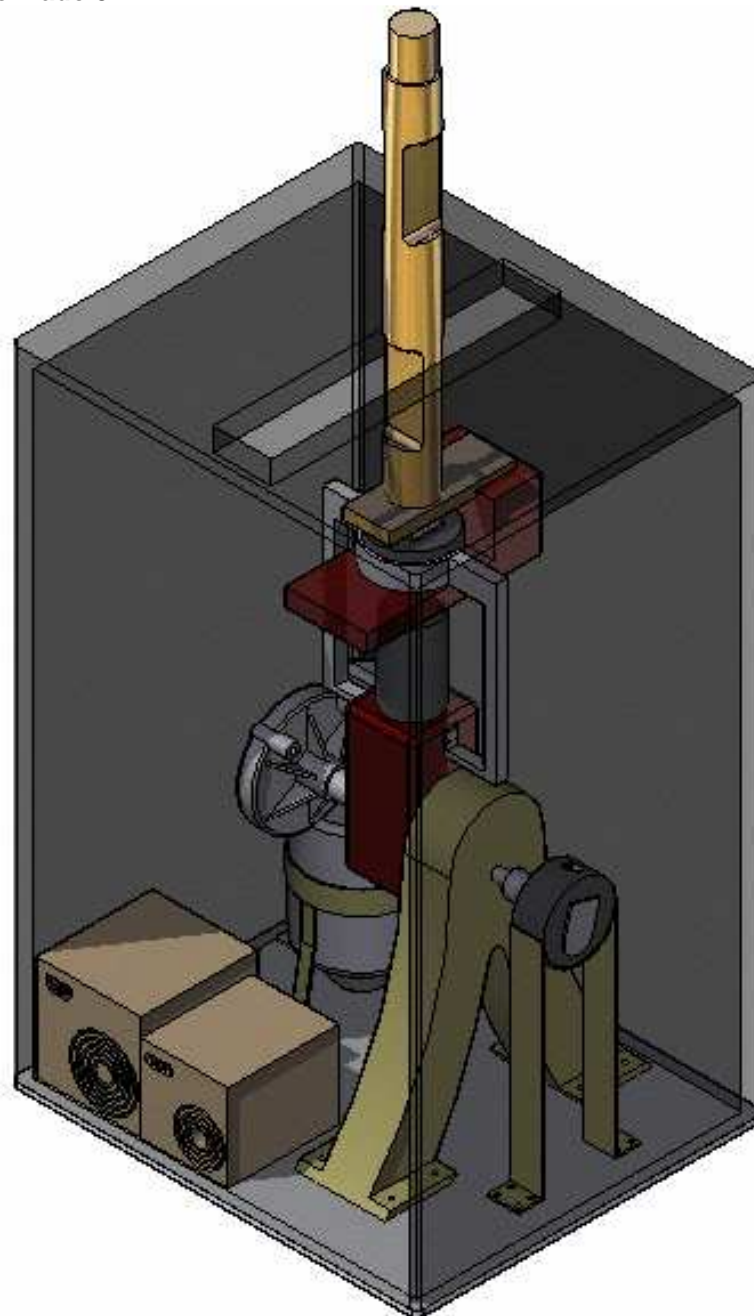
**Figura 70.** Ubicación de los prototipos.



## 9.1 PROTOTIPO VIRTUAL

Este prototipo se realiza con el fin de darle una idea al cliente del funcionamiento del prototipo y su diseño industrial.

*Figura 71. Renderizado 3D*



## 10. CONCLUSIONES

- Gracias a las diferentes etapas de diseño, hace que un producto sea de mejor calidad y además ser competitivo ante una sociedad que esta en continuo cambio tecnológico gracias a métodos convencionales como el QFD.
- De acuerdo a pasos seguidos, con los conocimientos adquiridos por medio de la carrera ingeniería Mecatrónica se cumplió con los objetivos, las necesidades y las restricciones propuestas por el Centro de Investigación CITA de la escuela militar de aviación.
- Con la planeación realizada se identifica plenamente que tipo de dispositivo se requiere, y sabiendo claramente cuál es el problema podemos proceder a dar soluciones que satisfagan óptimamente las necesidades planteadas.
- Por medio de conceptos generados, prototipos ya realizados, tecnología aplicada a estos se probaron los conceptos por medio de métodos estructurados y no estructurados para la selección y diversas combinaciones para la implementación y documentación adecuada dentro del proceso de diseño y creación de nuevos productos.
- El diseño final cumple con todos los parámetros propuestos al inicio, ya que sus mecanismos fueron diseñados por medio de normas tales que permiten hacer cualquier tipo de generación de ideas viable o no viable para un diseño óptimo y funcional.
- La visualización de variables, se va a llevar a cabo en tiempo real en cualquier posición deseada por el usuario, ya que de aquí parte el estudio de los aeromodelos tanto a fuerzas como de momentos a diferentes velocidades del viento.
- Esta idea del sistema de posicionamiento de una balanza aerodinámica en un túnel de viento subsónico, es muy buena, ya que de este estudio parten para la construcción de diferentes prototipos de aviones reales, respectivos materiales y diferentes formas aerodinámicas de partes de ellos.

## 11. RECOMENDACIONES

- El tiempo dedicado a esta pasantía en el Centro de Investigaciones CITA ubicada en la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez, se realizó un estudio detallado sobre diferentes tecnologías de posicionamiento de balanzas aerodinámicas alrededor del mundo, todo esto con el fin de desarrollar un producto funcional y sencillo, se espera futuras adecuaciones como el control de más grados de libertad para mejores pruebas tanto de despegue, aterrizaje y maniobras en el aire, ya que este diseño es de forma modular, además de ser acoplable cada una de sus partes hace de este diseño más sencillo.
- Como este diseño va dentro de un túnel de viento que consta con un motor trifásico y un variador de velocidad que proporciona el viento a diferentes velocidades, es recomendable controlar estos y el sistema de posicionamiento de la balanza aerodinámica, desde la misma consola de mandos, para evitar la pérdida de datos y hacer el trabajo del operario más útil.
- En la etapa de control de los motorreductores escogidos para este diseño, sería de gran importancia la construcción de todo el sistema para ver el comportamiento real por parte de Matlab, para un mejor control y mirar complicaciones futuras en el diseño real.

## BIBLIOGRAFIA

Análisis y optimización por elementos finitos para cualquier sistema CAD [en línea]. Bilbao España: Iberisa, 2001. [consultado 11 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/soporte\\_plastico.htm](http://www.iberisa.com/soporte/cosmosm/soporte_plastico.htm)

DAILY, James W. Dinámica de los Fluidos Con aplicaciones en la Ingeniería México: Trillas, 1969. 511 p.

Eltra srl catalogo on line. [en línea]. Sarego Italia: Eltra, 2006. [consultado 26 de mayo, 2006]. Disponible en Internet: [www.eltra.it/catalog/cat\\_list.asp?LANG=SPA&CAT=ENCASS&SHOWPG=enc\\_ass0\\_SPA.htm](http://www.eltra.it/catalog/cat_list.asp?LANG=SPA&CAT=ENCASS&SHOWPG=enc_ass0_SPA.htm)

ESCUELA MILITAR DE AVIACIÓN MARCO FIDEL SUÁREZ [en línea]. Santiago de Cali: Fuerza Aérea Colombiana, 2006. [consultado 26 de febrero, 2006]. Disponible en Internet: [www.emavi.edu.co](http://www.emavi.edu.co)

GENE, Franklin; POWELL J. David. Control de sistemas dinámicos con retroalimentación. Reading. Massachussets, Addison-Wesley, 1991. 618 p.

INSTITUTO UNIVERSITARIO AERONÁUTICO. Túnel de Viento Subsónico Mayor [en línea]. Córdoba Argentina: La Universidad de la Fuerza Aérea, 2006. [consultado 11 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [www.iaa.edu.ar/Investigación/túnel/espanol/mswt.htm](http://www.iaa.edu.ar/Investigación/túnel/espanol/mswt.htm).

MUÑOZ, M.A.. Principios Aerodinámicos [en línea]. Madrid España: Manual de Vuelo, 2002. [consultado 10 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [www.inicia.es/de/vuelo/PBV/PBV12.html](http://www.inicia.es/de/vuelo/PBV/PBV12.html)

NORTON, Robert. Diseño de Maquinas. New York: McGraw-Hill, 1971. 794 p.

OGATA, Katsuhiko. Dinámica de Sistemas. México: Prentice-Hall, 1987. 619 p.

OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. México: Prentice Hall, 2001. 902 p.

Omega Engenieering [en línea]. U.S.A: Omega, 2006. [consultado 24 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [www.omega.com/Pressure/pdf/gen\\_purpose\\_strain\\_SG.pdf](http://www.omega.com/Pressure/pdf/gen_purpose_strain_SG.pdf)

Omega Engineering [en línea]. U.S.A: Omega, 2006. [consultado 24 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=DMD--465&Nav=prec04](http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=DMD--465&Nav=prec04)

OTTO, Kevin. Products Designs. Techniques in Reverse Engineering and New Product Development. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2001. 1071 p.

Pyramidal balances [en línea]. Washington U.S.A: Aerolab, 2005. [consultado 11 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [www.aerolab.com](http://www.aerolab.com)

SHAMES, Irving H. Mecánica de Fluidos. Santa Fe de Bogotá: Mc Graw-Hill, 1995. 825 p.

ULRICH, Karl; SPPINDER, Steven. Product Design and Development. 2 ed. United States of America: Mc. Graw-Hill, 2000. 358 p.

Valeo – Catalogue Drive Technology [en línea]. Germany: Valeo, 2005. [consultado 10 de mayo, 2006]. Disponible en Internet: [www.valeo-swf-motoren.de/html/showmotor.php?id\\_artikel=1861&id\\_sprache=2](http://www.valeo-swf-motoren.de/html/showmotor.php?id_artikel=1861&id_sprache=2)

SÁNCHEZ Walter O.. Soporte de Bayoneta ó Pértiga [en línea]. Córdoba Argentina, 2004. [consultado 11 de marzo, 2006]. Disponible en Internet: [http://ar.geocities.com/wwwsanchez/apendice\\_a.htm](http://ar.geocities.com/wwwsanchez/apendice_a.htm)

## ANEXOS

### **Anexo A.** Data Sheet Motorrrductor Marca Valeo serie 402826

<b>402 853</b>  <b>24V</b> <b>0292 SWMG</b> <b>M<sub>N</sub> = 20.0 Nm</b>	Rated voltage	<b>U<sub>N</sub></b>	24 Volt
	No-load speed	<b>n<sub>0</sub></b>	27 min <sup>-1</sup>
	Norminal torque	<b>M<sub>N</sub></b>	20.0 Nm
	Duration		%
	ON		min
	Starting torque	<b>M<sub>A</sub></b>	90.0 Nm
	Gear ratio	<b>i</b>	50/1
	Connection resistance	2 Laminations <b>R</b>	900.0 mΩ
		4 Laminations <b>R</b>	800.0 mΩ
	Connection inductance	2 Laminations <b>L</b>	4.2 mH
		4 Laminations <b>L</b>	3.7 mH
	Rotor moment of inertia	<b>J<sub>R</sub></b>	520.0x10 <sup>-6</sup> kgm <sup>2</sup>
	Gear material		plastic
<u>Hall-IC</u>			
Pulses/Revoultion of output shaft			
Output channel			
Remarks			
	Protection		IP 20
	Weight		4.200 kg



**Anexo B.** Data Sheet *Motorreductor Marca Valeo serie 404465*

**404 465**

**24V**

**0231 GMPI**

**$M_N = 4.0 \text{ Nm}$**

Rated voltage		$U_N$	24 Volt
No-load speed		$n_0$	210 min <sup>-1</sup>
Norminal torque		$M_N$	4.0 Nm
Duration	ON		% 10 min
Starting torque		$M_A$	19.5 Nm
Gear ratio		$i$	39,7/1
Connection resistance	2 Laminations	$R$	562.0 m $\Omega$
	4 Laminations	$R$	420.0 m $\Omega$
Connection inductance	2 Laminations	$L$	0.6 mH
	4 Laminations	$L$	0.48 mH
Rotor moment of inertia		$J_R$	13.0x10 <sup>-6</sup> kgm <sup>2</sup>
Gear material			plastic

Hall-IC

Pulses/Revoultion of output shaft

Output channel

Remarks	d = 3,3mm, for self-cutting screw 4mm
Protection	IP 50
Weight	0.630 kg

## Anexo C. Data Sheet Sensor de Posición Inteligente ESDigital A2

### Absolute Maximum Ratings:

(Voltages referenced to GND)

Parameter	Min.	Max.	Units
Storage Temperature	-40	100	°C
Operating Temperature	-25	70	°C
Humidity (Non-condensing)	0	95	%
Supply Voltage (PWR)	0	16	Volts
DataH, DataL, Busy+, Busy-	-14	14	Volts
A2 Electrical tracking (Multi-turn Mode)	-	1800	RPM
A2 Electrical Tracking (Single-turn Mode)	-	3600	RPM
A2 Position Update Rate*	-	4	mSec

\* The internal microcontroller takes a snapshot of the disk every 4 msec. and stores the position in memory. It responds immediately to a "report position request" by sending this value which is always the most current position.

### Electrical Specifications:

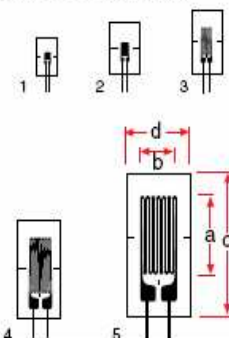
- Specifications apply over entire operating temperature range.
- Typical values are specified at Vcc= 12V and 25°C.

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
Supply Voltage (PWR)	5.5	-	16	Volts
Supply Current (Active)	-	14	18.5	mA
Supply Current (Sleep)	-	-	1.5	mA
Analog Output Impedance (Anlg+)	950	1000	1050	Ohms
Zero Scale Analog Voltage	0	.0005	.003	Volts
Full Scale Analog Voltage	4.079	4.095	4.111	Volts
Differential Nonlinearity	-1.0	-	1.0	LSB

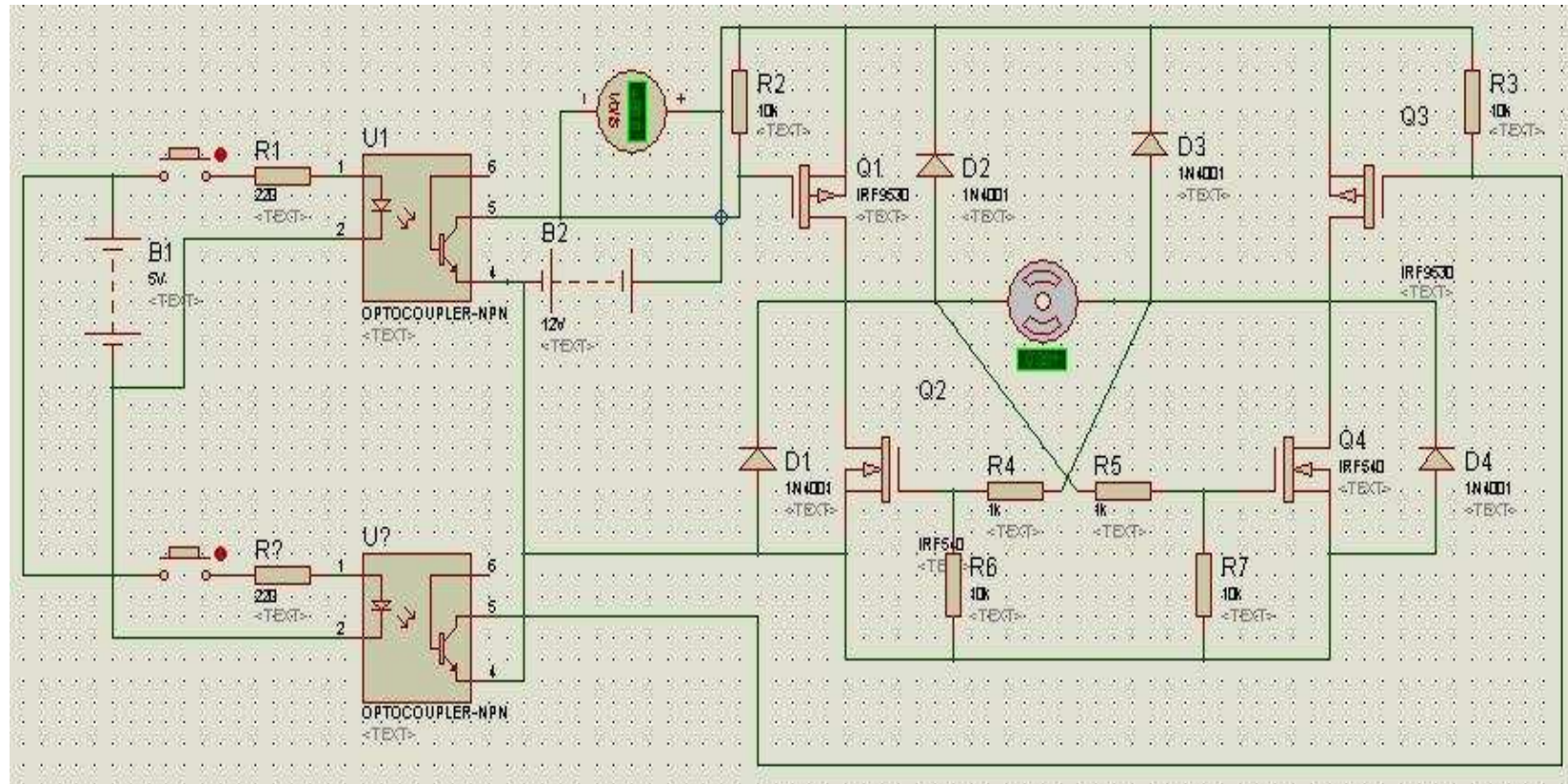
### Pin-out

Pin	Description
1	Ground
2	Busy+ Analog+
3	Busy- Analog-
4	Power
5	DataL
6	DataH

**Anexo D.** Especificaciones Técnicas de las Galgas Extensiométricas

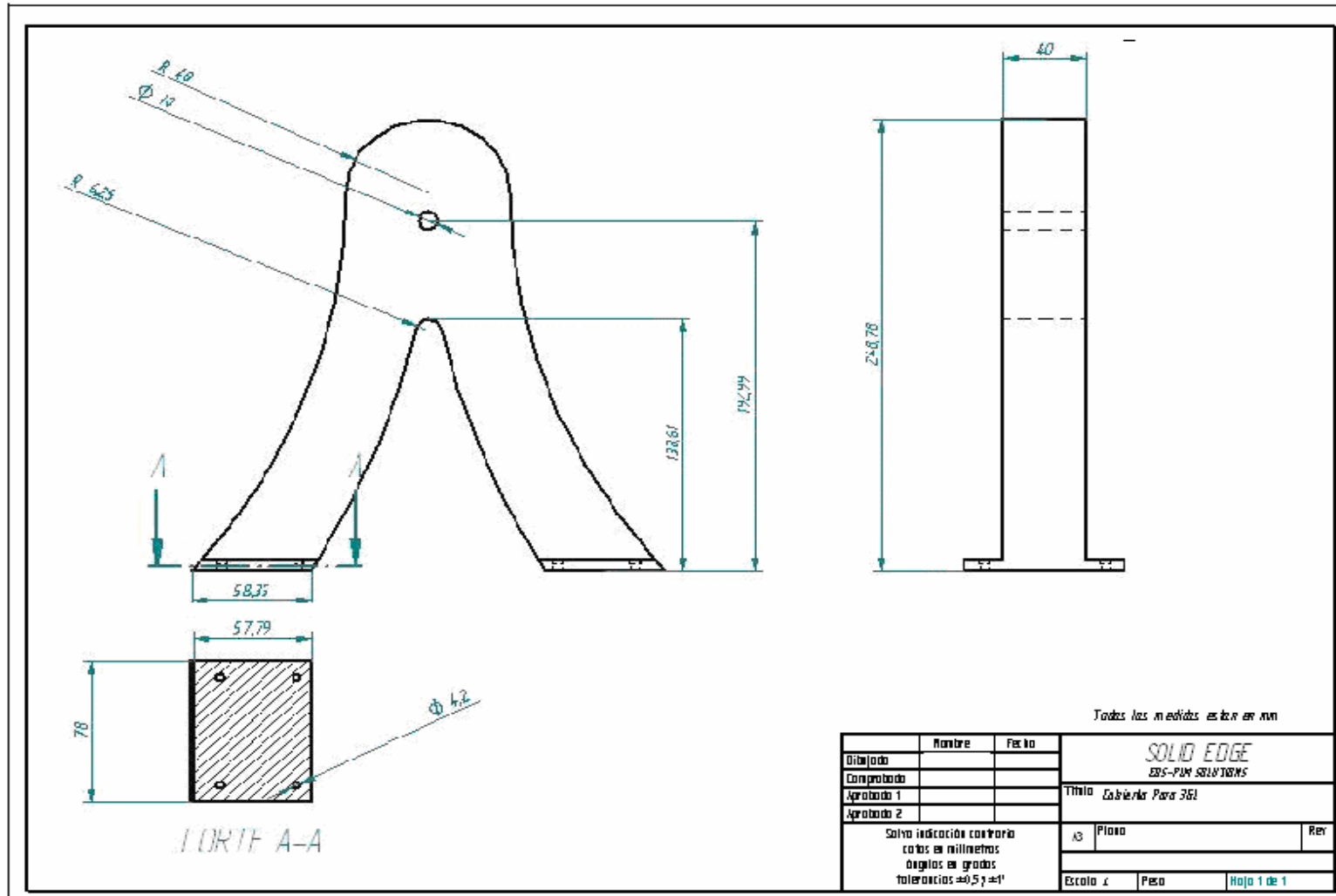
To Order (Specify Model Number)										
TYPE SERIES	MODEL NO.	PRICE PER PKG OF 10	NOMINAL RESISTANCE ( $\Omega$ )	DIMENSIONS [MM]				MAX PERMITTED BRIDGE ENERGIZING VOLTAGE (V RMS)	ACCESSORY TERMINAL PADS PART NO.	FIG.
				A	B	C	D			
<b>LY13</b> Temperature characteristics matched to aluminum 	SG-13/1000-LY11	125	1000	.13.5	5.5	24.0	12.0	30	TP-3	5
	SG-1.5/120-LY13	49	120	1.5	1.1	4.8	3.5	3	TP-1	1
	SG-2/350-LY13	55	350	2.0	1.8	7.5	4.5	5	TP-1	2
	SG-3/120-LY13	55	120	3.0	1.5	8.0	4.0	6	TP-2	3
	SG-3/350-LY13	55	350	3.0	2.5	8.0	6.0	8	TP-2	3
	SG-6/120-LY13	70	120	6.0	3.0	12.5	6.0	10	TP-3	4
	SG-7/350-LY13	79	350	7.0	3.5	14.0	8.0	15	TP-3	4
	SG-7/1000-LY13	145	1000	7.0	3.8	12.0	6.0	20	TP-3	4
	SG-13/1000-LY13	125	1000	13.5	5.5	24.0	12.0	30	TP-3	5
	For Accessory Terminal Pads, see page E-25.									

## Anexo E. Esquema Circuit Driver

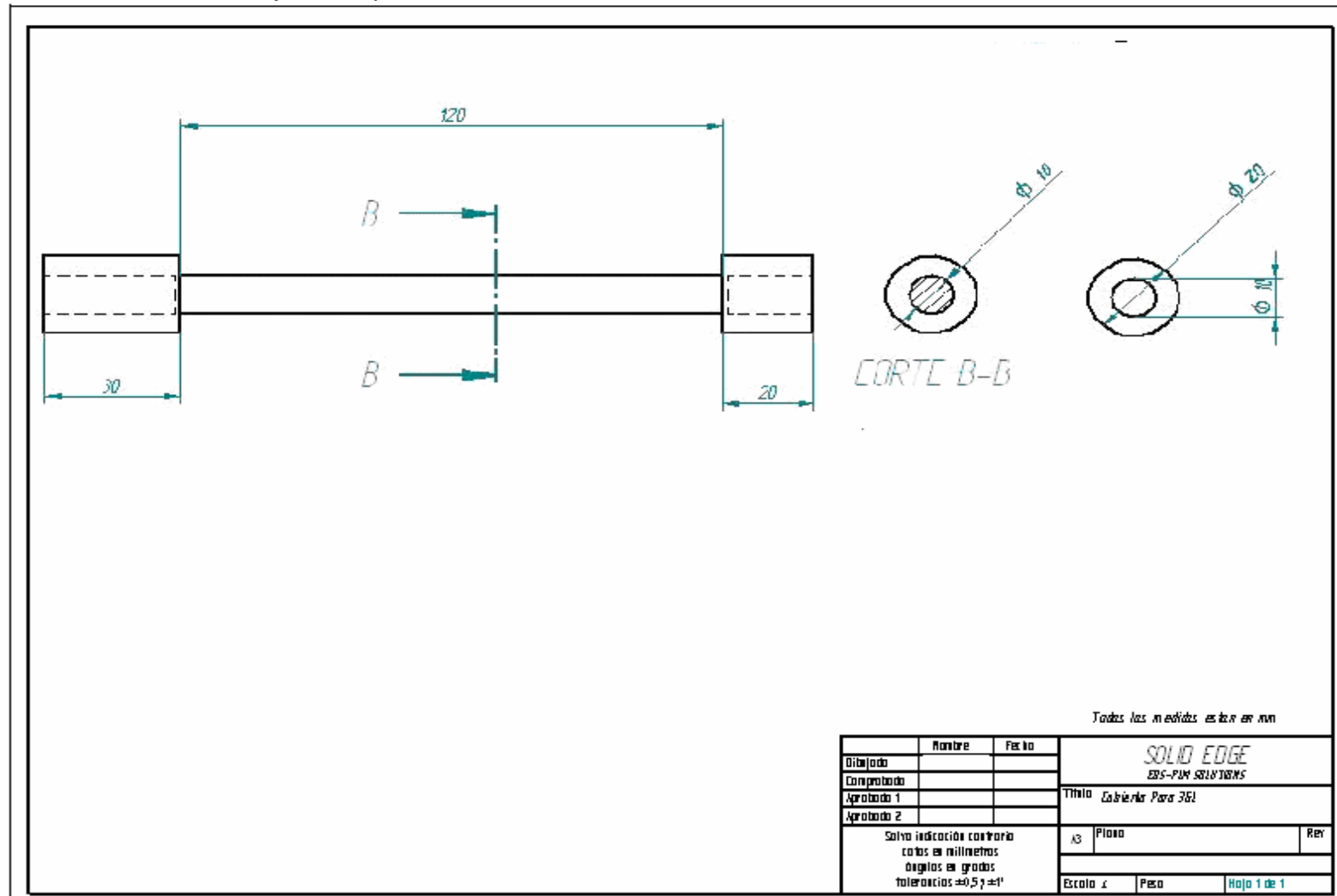


## Planos de Partes Propias

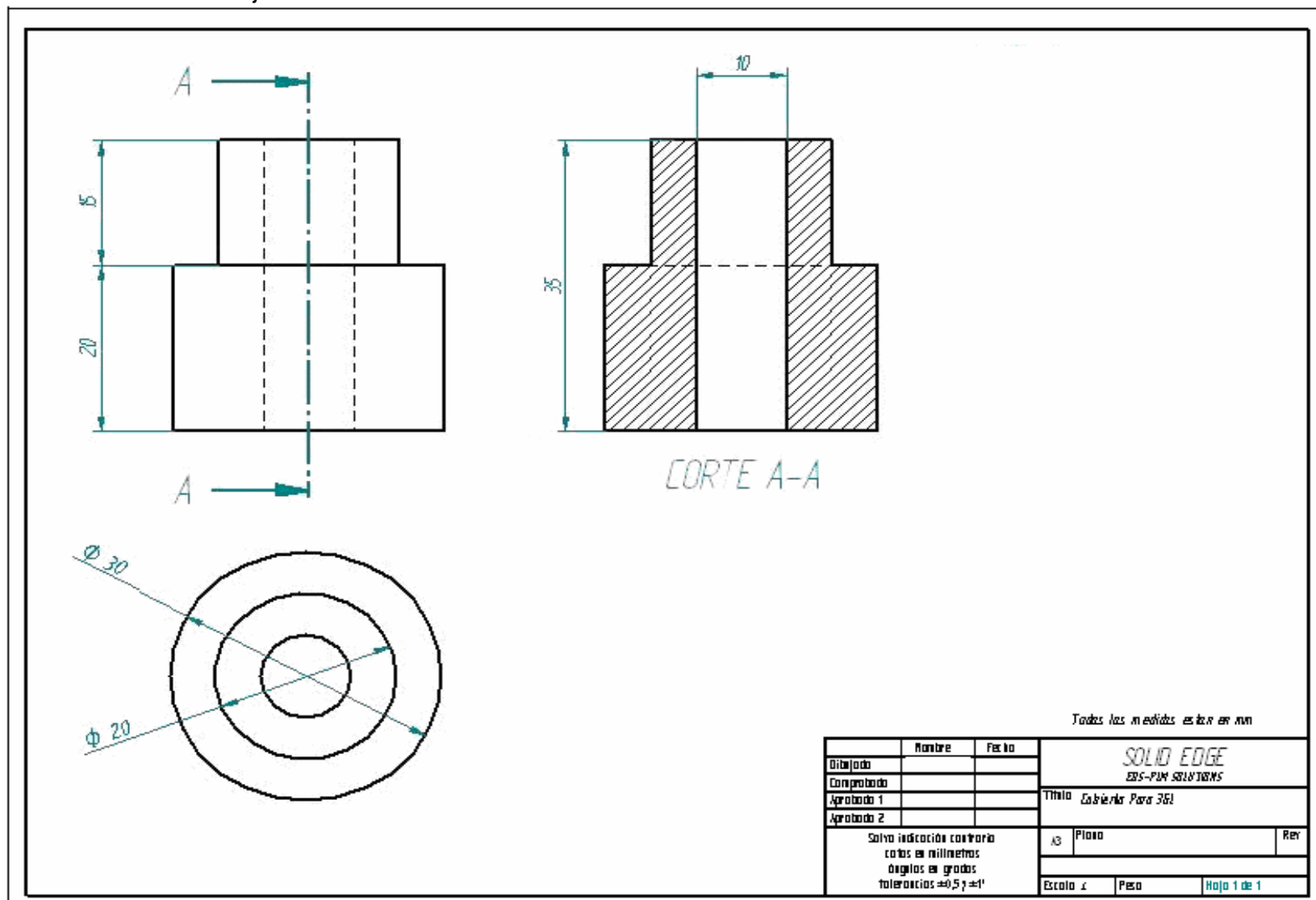
### Anexo F. Plano Soporte del Eje Principal



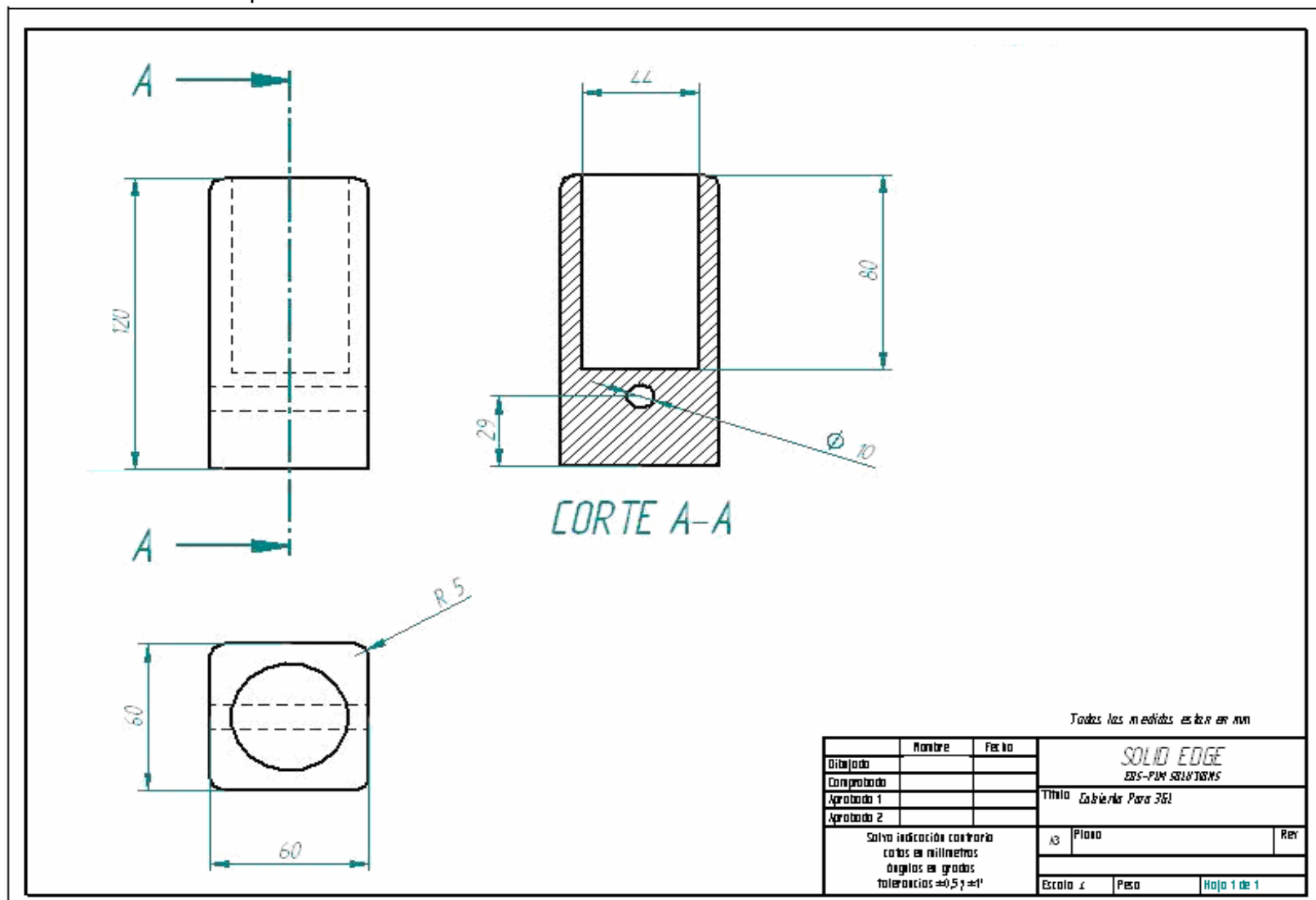
## Anexo G. Plano del Eje Principal



# **Anexo H.** Plano del Eje Secundario

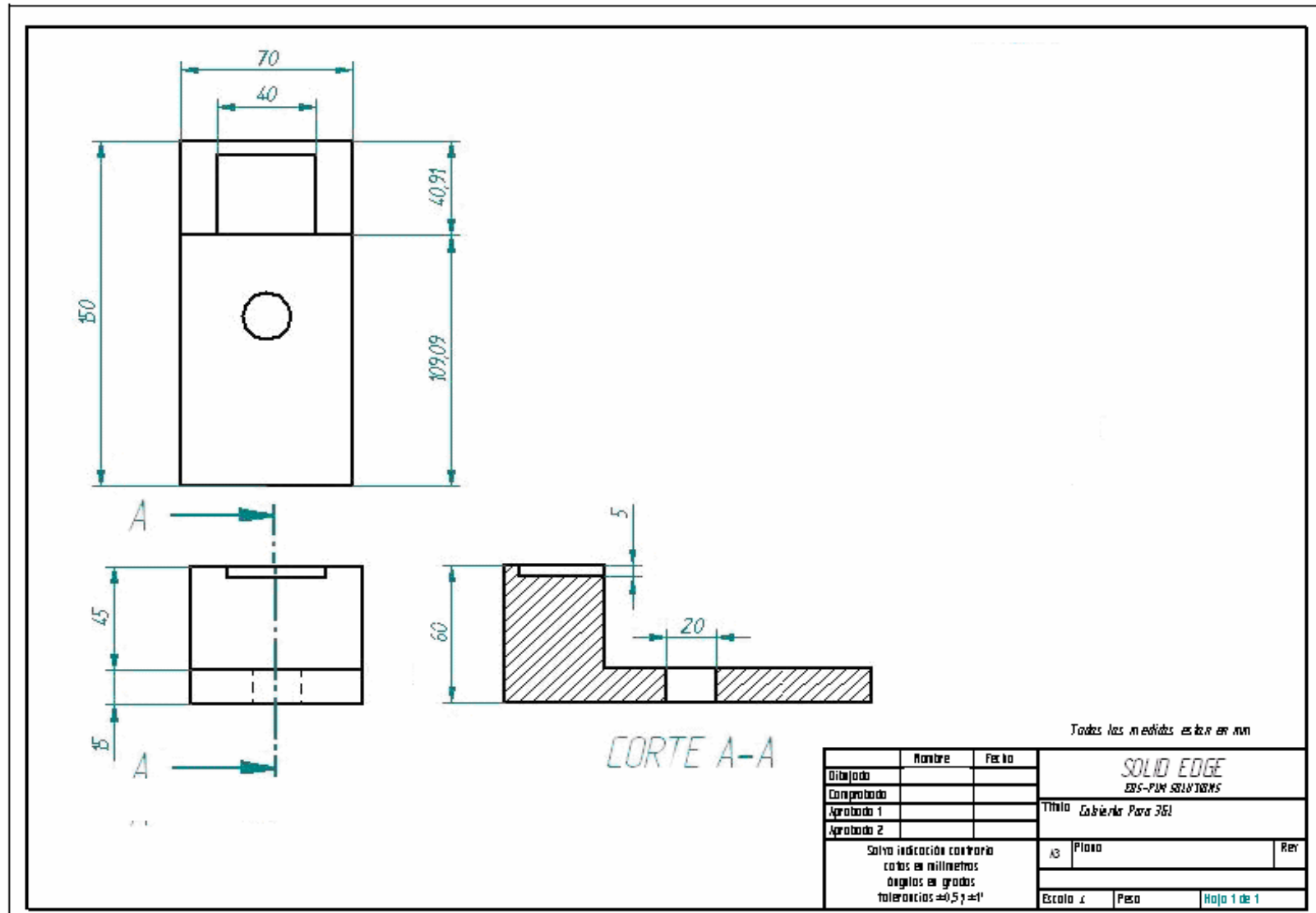


# **Anexo I.** Plano del Soporte del Motor 2

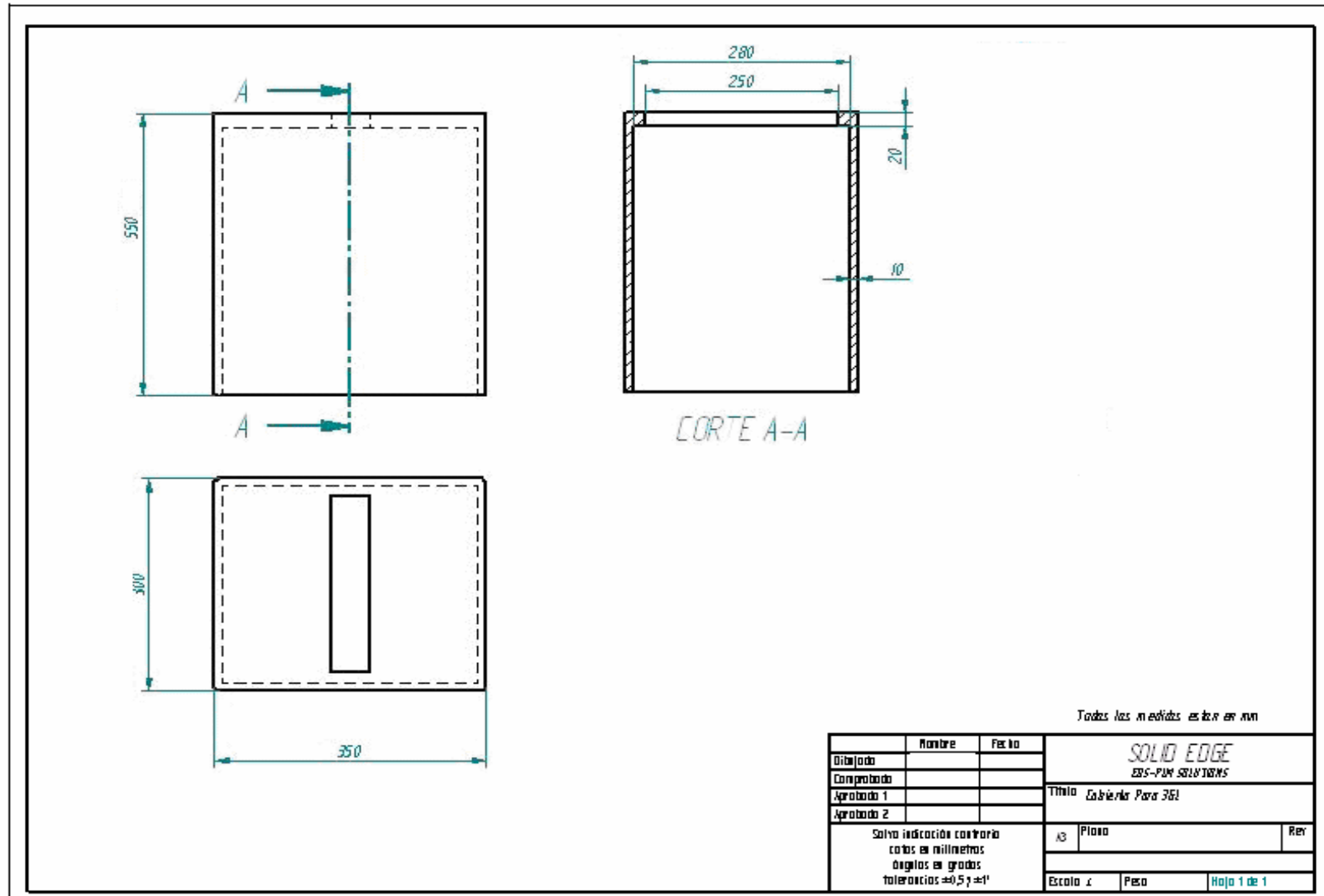




## Anexo J. Plano Soporte de la Balanza



# **Anexo K.** Plano Cubierta del Sistema



**Anexo L.** Diseño en MATLAB del Controlador para el Motor 1.

```
num=[3.43]
```

```
num =
```

```
3.4300
```

```
>> den=[0.000747 0.160 3.02 0]
```

```
den =
```

```
0.0007 0.1600 3.0200 0
```

% Debido a que el controlador que se va a diseñar se realizara por realimentación de estados el primer paso a seguir es convertir su función de transferencia en su representación matricial es decir variables de estado

```
>> [a,b,c,d]=tf2ss(num,den)
```

```
a =
```

```
1.0e+003 *
```

```
-0.2142 -4.0428 0  
0.0010 0 0  
0 0.0010 0
```

```
b =
```

```
1  
0  
0
```

```
c =
```

```
1.0e+003 *
```

```
0 0 4.5917
```

```
d =
```

0

%Ahora se encuentran los polos de la Planta

```
>> eig(a)
```

ans =

```
0  
-20.9178  
-193.2723
```

% Debido al polo que se encuentra en cero no puede ser muy conveniente para la estabilidad del sistema por se le asigna un nueva posición, hay que tener en cuenta que si se aumenta demasiado la posición de los polos, esto puede hacer que mejore el tiempo de respuesta del sistema, pero también incrementa su esfuerzo de control, para este caso el polo que se encuentra en 0 se lo desplaza a -3 y los demás se los deja como estaban.

```
>> pd=[-3 -20.9178 -193.2723]
```

pd =

```
-3.0000 -20.9178 -193.2723
```

% ahora se encuentra la matriz de ganancia de retroalimentación del Sistema

```
>> k=place(a,b,pd)
```

k =

```
1.0e+004 *  
0.0003 0.0643 1.2128
```

% Se eligen los polos del Observador, estos deben ser mayores a los de la planta, esto con el fin de que sirvan como señal de corrección al modelo de la planta, que tener en los parámetros desconocidos de la planta real.

```
>> po=[-6 -40 -193.2723]
```

po =

```
-6.0000 -40.0000 -193.2723
```

%Se calcula la Matriz de Ganancia del Observador

```
>> h=acker(a',c',po)
```

h =

```
1.2971 -0.0620 0.0055
```

```
>> h=h'
```

h =

```
1.2971  
-0.0620  
0.0055
```

Debido al error de estado estacionario de la señal después de haber diseñado el Regulador con Observador de estados se diseña un Seguidor - Observador

```
>> aa=[a,zeros(3,1);-c,0]
```

aa =

```
1.0e+003 *
```

```
-0.2142 -4.1232 0 0  
0.0010 0 0 0  
0 0.0010 0 0  
0 0 -4.5917 0
```

```
>> ba=[b;0]
```

ba =

```
1  
0  
0  
0
```

```
>> pda=[pd -193.2723]
```

pda =

```
-3.0000 -20.9178 -193.2723 -193.2723
```

```

>> kt=acker(aa,ba,pda)

kt =

    1.0e+005 *
    0.0020    0.4254    9.1769   -0.0051

>> kp=kt(1:1,1:3)

kp =

    1.0e+005 *
    0.0020    0.4254    9.1769

>> ki=kt(1:1,4:4)

ki =

   -510.5085

```

## **ANEXO M. DISEÑO EN MATLAB DE CONTROLADOR PARA EL MOTOR 2**

Para el diseño de este controlador se implemento el mismo diseño que se realizo para el primer Motor, se lleva su Función de transferencia a su representación matricial y se procede con los cálculos explicados anteriormente.

```

num=[0.83]

num =

    0.8300

>> den=[0.00000168 0.00157 0.0955 0]

den =

    0.0000    0.0016    0.0955     0

>> [a,b,c,d]=tf2ss(num,den)

```

a =

1.0e+004 \*

-0.0935	-5.6845	0
0.0001	0	0
0	0.0001	0

b =

1  
0  
0

c =

1.0e+005 \*

0      0      4.9405

d =

0

% Se calculan sus polos originales

>> eig(a)

%Se encuentra que el comportsmirnto de este motor es muy similar al del primer Motor por lo que se puede anticipar que simplemente el diseño de un Regulaor con Observador no sera suiciente para que la señal siga la referencia en optimas condiciones.

ans =

0  
-65.4056  
-869.1182

pd=[-3.0000 -65.4056 -869.1182]

```

pd =

    -3.0000  -65.4056  -869.1182

>> k=place(a,b,pd)

k =

    1.0e+005 *

    0.0000    0.0280    1.7054

>> po=[-4 -90 -870]

po =

    -4   -90  -870

>> h=acker(a',c',po)

h =

    1.5012  -0.0046    0.0001

>> h=h'

h =

    1.5012
   -0.0046
    0.0001

>> aa=[a,zeros(3,1);-c,0]

aa =

    1.0e+005 *

   -0.0093  -0.5685         0         0
    0.0000         0         0         0
         0    0.0000         0         0
         0         0   -4.9405         0

>> ba=[b;0]

```



```

ba =

    1
    0
    0
    0

pda=[pd,-100]

pda =

   -3.0000  -65.4056 -869.1182 -100.0000

>> kt=acker(aa,ba,pda)

kt =

   1.0e+006 *

    0.0001    0.0966    6.1354   -0.0000

>> kp=kt(1:1,1:3)

kp =

   1.0e+006 *

    0.0001    0.0966    6.1354

>> ki=kt(1:1,4:4)

ki =

   -34.5180

```

## **ANEXO N. Paper**

# **DISEÑO DE SISTEMA MECATRONICO DE POSICIONAMIENTO DE UNA BALANZA AERODINAMICA PARA UN TUNEL DE VIENTO SUBSONICO PARA LA SIMULACION DE AEROMODELOS**

**Gustavo Adolfo Arce Libreros**

**Javier Eduardo Enríquez Ortega**

[javiere83@hotmail.com](mailto:javiere83@hotmail.com)

[gustavotavo32@hotmail.com](mailto:gustavotavo32@hotmail.com)

*Ingeniería Mecatrónica*

*Universidad Autónoma de Occidente*

En el siguiente paper se tratara de explicar las diferentes etapas de diseño que se llevaron a cabo para la realización de este trabajo desde la recolección de información para identificar los aspectos y necesidades mas relevantes que el cliente quiere para su producto hasta el diseño detallado del mismo explicando el porque de cada cosa que se realizo durante el diseño incluyendo la parte mecanica, electronica y su respectiva fase de control , llevando estas tres etapas de forma concurrente lo que permite un diseño muy optimo, y lo mas importante que tanto el cliente como los diseñadores se sientan identificados con el diseño del producto.

Palabras claves: balanza aerodinámica, control de posición, esfuerzos y momentos, instrumentación.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Nuestro mundo esta en continuo cambio tecnológico en diferentes campos, sobre todo en la industria militar, ya que este invita a todo tipo de investigaciones.

Este trabajo de investigación se realiza con el fin de comprender el efecto que el aire ejerce sobre las partículas u objetos en movimiento, lo que se conoce como aerodinámica y la importancia del estudio de esta en la actualidad para entender y mejorar el desempeño tanto de vehículos de

velocidad, como de aviones, ya sean de carga o transporte de pasajeros.

En este proyecto se llevara a cabo el diseño de un control de posición con dos grados de libertad independientes para simular diferentes posiciones con el fin de medir fuerzas y momentos aerodinámicos que interactúan en aeromodelos; los cuales serán interpretados para analizar modelos a escala real.

Aplicando los conocimientos adquiridos durante la carrera y a la necesidad planteada por el centro de investigación de la fuerza aérea CITA, se llevara a cabo el respectivo diseño tanto mecánico, como electrónico con su respectiva etapa de control.

## 2. DESCRIPCION DEL PRBLEMA

En Colombia la fuerza aérea esta iniciando con gran aceptación la investigación de nuevos proyectos, para el continuo avance tecnológico que esta afrontando nuestro país.

El centro de investigaciones CITA de la fuerza aérea esta viendo la necesidad de simular y entender el comportamiento de las fuerzas y momentos que se presentan en aeromodelos, con el fin de facilitar la obtención de datos e interpretarlos para poder aplicarlos en modelos de aviones reales, para su futura construcción aquí en Colombia.

## 3. MARCO TEORICO

Para la realización de este proyecto en necesario saber sobre algunos conceptos de la aerodinámica; esta es la parte de la

mecánica de fluidos que estudia los gases en movimiento y las fuerzas o reacciones a las que están sometidos los cuerpos que se hallan en su seno. A la importancia propia de la aerodinámica hay que añadir el valor de su aportación a la aeronáutica. De acuerdo con el *número de Mach* o velocidad relativa de un móvil con respecto al aire, la aerodinámica se divide en *subsónica* y *supersónica* según que dicho número sea inferior o superior a la unidad <sup>[2]</sup>.

Hay ciertas leyes de la aerodinámica, aplicables a cualquier objeto moviéndose a través del aire, que explican el vuelo de objetos más pesados que el aire. Para el estudio del vuelo, es lo mismo considerar que es el objeto el que se mueve a través del aire, como que este objeto esté inmóvil y es el aire el que se mueve (de esta ultima forma se prueban en los túneles de viento prototipos de aviones).

Daniel Bernoulli comprobó experimentalmente que "la presión interna de un fluido (líquido o gas) decrece en la medida que la velocidad del fluido se incrementa", o dicho de otra forma "*en un fluido en movimiento, la suma de la presión y la velocidad en un punto cualquiera permanece constante*", es decir que:

$$p + v = k \quad \text{Ec (1)}$$

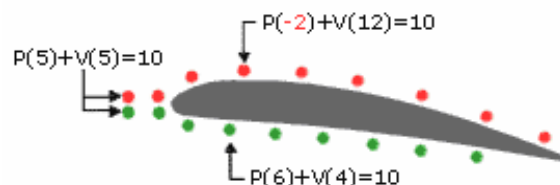


Figura 1. Teorema de Bernoulli en diferentes puntos de una superficie

Para que se mantenga esta constante **k**, si una partícula aumenta su velocidad **v** será a costa de disminuir su presión **p**, y a la inversa.

El teorema de Bernoulli se suele expresar en la forma  $p + 1/2 dv^2 = constante$ , denominándose al factor **p** presión estática y al factor  $1/2 dv^2$  presión dinámica.

$$p + 1/2 dv^2 = k; \text{ Ec (2)} \quad 1/2 dv^2 = pd$$

Ec (3)

**p**=presión en un punto  
dado. **d**=densidad del  
fluido

**v**=velocidad en dicho punto

**pd**=presión dinámica.

En el estudio de la aviación se construyen diferentes prototipos para medir diferentes variables depende de la aplicación deseada, pero especificaremos 2 prototipos de los mas importantes, como podemos ver en la figura 2 este prototipo es realizado en la nasa<sup>[3]</sup> para aviones de gran velocidad y de resistencia a grande alturas y grande presiones, y en la figura 3 Este diseño<sup>[4]</sup>, posee 6 grados de libertad en el cual se realizan muchas pruebas como determinar fuerzas de sustentación y resistencia y momento de cabeceo, fuerza lateral y momento de guñada y rolido presiones en diferentes puntos sobre la superficie.

De aquí parte la investigación y diseño para ubicar un aeromodelo, el cual estará fijo a una balanza, con dos grados de libertad (elevación y rotación).

Se debe tener un respectivo control en el cual no influya en la toma de datos para los análisis, para esto el dispositivo debe ser muy preciso.

#### 4. PERMISAS Y RESTRICCIONES

- Dispositivo Mecatrónico que permita la sujeción y manipulación de diferentes aeromodelos.
- Carga máxima de los aeromodelos 500grm
- El tamaño de la balanza debe de ser acorde a las dimensiones del túnel de viento.
- Debe de tener control para 2 grados de libertad.
- Utilizar galgas extensiométricas para monitorear fuerzas y momentos.
- Permitir ver en tiempo real las fuerzas que interactúan en los respectivos aeromodelos.
- La resolución del posicionamiento debe ser de 0.1°.

##### 4.1 Identificación de las necesidades del cliente

Para el óptimo diseño de un producto se debe tener en cuenta la identificación de las necesidades del cliente. Por esta razón se organizó una lista de necesidades donde se destacan tres grandes grupos; necesidades funcionales, necesidades estructurales y necesidades estéticas, luego se le dio un nivel de importancia a cada una de estas necesidades.

##### 4.1.1 Necesidades funcionales

- Que el aeromodelo tome diferentes posiciones.
- Que se puedan visualizar los datos que se generan en las diferentes pruebas.
- Que el software lleve una plataforma particular y entendible.

- Que sea preciso.

#### 4.1.2 Necesidades estructurales

- Se quiere que la balanza sea a escala del túnel de viento.
- Que se puedan hacer rediseños sobre su misma plataforma.
- Facilidad para acoplar no solo aeromodelos si no también parte de ellos.
- Que su estructura no perjudique en la toma de datos.
- Que el material escogido para la estructura sea acorde con las respectivas deformaciones para que no se vean afectadas la toma de medidas.

#### 4.1.3 Necesidades estéticas y económicas

- Que tenga buena presentación.
- Que el presupuesto para la futura construcción de la balanza sea viable.
- Que su estructura sea fácil de entender.
- Se requiere que la balanza tenga un consumo de corriente razonable.

## 5. BENCHMARKING

En este estudio se analiza detalladamente la satisfacción de las necesidades del cliente en productos competidores otorgando una calificación de 1 a 5, esto con la finalidad de diseñar un producto que cumpla con todas las necesidades del cliente y llene los espacios que la competencia ha dejado.

## 6. GENERACIÓN DE CONCEPTOS

Para este punto se ve el dispositivo como una caja negra, donde entran señales de

voltaje que se traducen tanto en señales de control como de monitoreo como se observa en la figura 2.

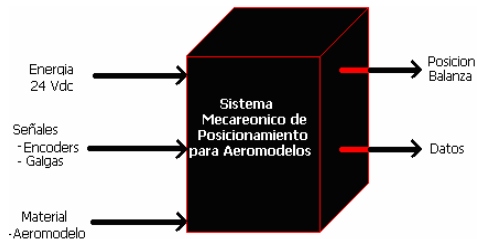


Figura 2. Caja negra Funcionamiento Básico del Posicionador.

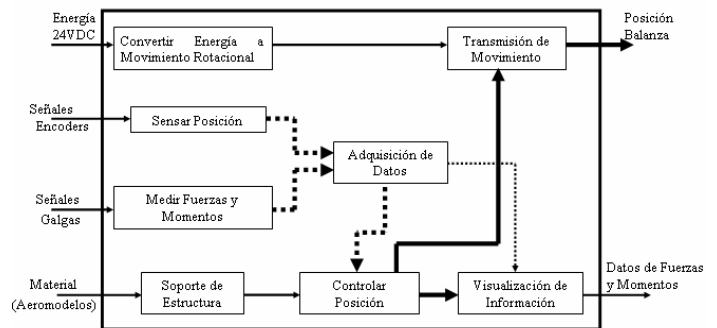


Figura 3. Descomposición Funcional del Sistema.

Para esta etapa de Diseño resultaron 5 conceptos de los cuales se va hablar solamente del concepto seleccionado.

El concepto que se muestra en la figura 4 fue seleccionado por las características que presentan sus actuadores por ser mas aptas al tipo de cargas a que va a estar sometiendo dicho prototipo, además por la misma forma de los actuadores este diseño plantea un

diseño robusto y confiable que se adapte al uso que le vaya a dar dicho cliente.

### 6.1 Concepto Desarrollado

- Motorreductor DC
- Encoder absoluto
- Galgas Extensiometricas
- Balanza tipo L
- Muestreo y controlador Por PC

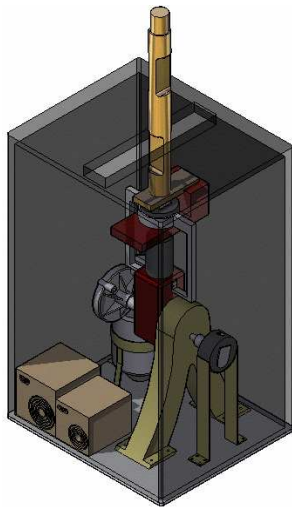


Figura 4. Concepto Desarrollado

Diseño de sistema de posicionamiento de una balanza aerodinámica para un túnel de viento subsónico para la simulación de aeromodelos con dos grados de libertad (elevación y rotación), con el fin de simular fuerzas y momentos que se presentan en estos para el estudio y futura construcción de partes de aviones.

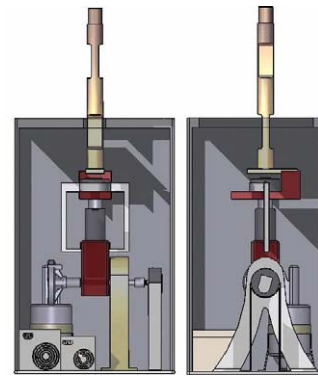


Figura 5. Diseño escogido (concepto 4)

Este diseño se escogió gracias a las necesidades del cliente, se diseñó de manera robusta ya que tendrá que soportar grandes fuerzas tanto de arrastre, como de retención por parte de los motores.

En la figura 6, se muestra todo el funcionamiento del sistema de posicionamiento, como se puede notar en la figura, la balanza tiene unos puntos, que representan la ubicación de las respectivas galgas en la balanza, para determinar los esfuerzos ejercidos sobre el aeromodelo, las señales que entregan estas se dirigen a dos módulos los cuales van a amplificar y a instrumentar la señales y de aquí pasan a una DAQ (Tarjeta de Adquisición de Datos) para poder llegar al PC para su respectiva visualización.

El control de los motores se van a dar por medio del PC, el cual transmite señales por otra DAQ para poder ordenar a los DRIVERS (puente H - PWM) de cada motor cuando moverse y para la posición exacta están dos sensores los cuales van a estar realimentando la posición constantemente mandando señales digitales a la DAQ para el controlador elaborado en Matlab.

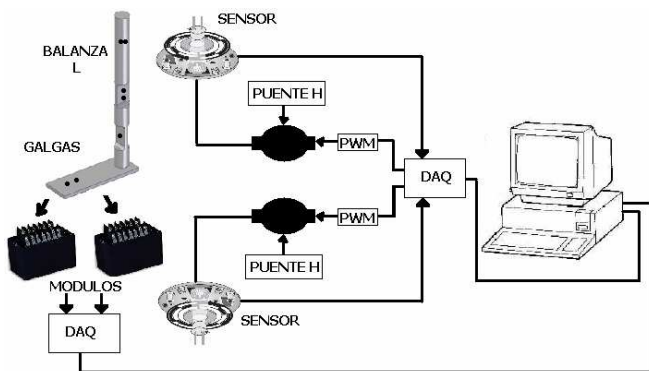


Figura 6. Esquema funcional

## 7. MATERIALES

### 7.1 Convertir Energía a Movimiento Rotacional

Para el concepto seleccionado se tomó la decisión de motorreductor DC, ya que posee la fuerza y el torque necesario para mover y soportar grandes estructuras, además de su fácil control.

Se seleccionaron 2 tipos de motores; a continuación se mostrarán los que mejor cumplen con todas las características y comportamientos del sistema a diseñar que es el troqué nominal y además el de retención.

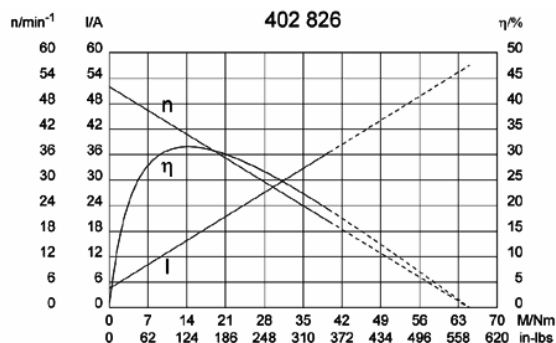


Figura 7. Curva Característica Motor Valeo 402 826

El segundo motor que se escogió cumple tanto con las fuerzas requeridas como las dimensiones adecuadas para un óptimo diseño y futura implementación:

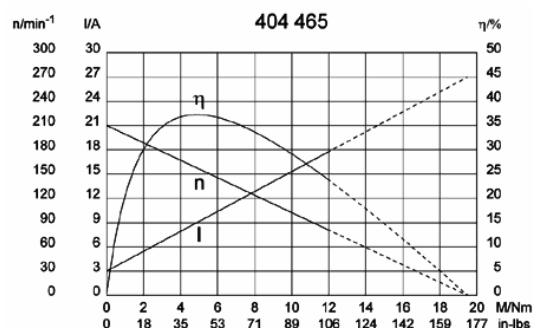


Figura 8. Curva Característica Motor Valeo 404 465

### 7.2 Sensor Posición

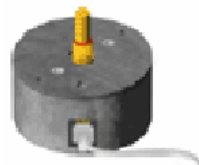


Figura 9. Sensor A2 USDigital de Posición Angular

Este Sensor fue escogido de acuerdo a sus características de resolución, ya que posee una salida analógica lineal, además ofrece una resolución de  $0,088^\circ$  que es mucho menor a la pedida por el CITA que es de  $0,1^\circ$ , lo cual hace el sistema mas precisa.

### 7.3 Sensor Fuerzas y Momentos

La galgas a utilizar son marca omega de 120 Ohm de referencia SG-6/120-LY-13; estas galgas fueron seleccionadas ya que su tamaño se asemeja mas al diseño creado, gracias a su

tamaño además de las especificaciones y los datos que proporciona.

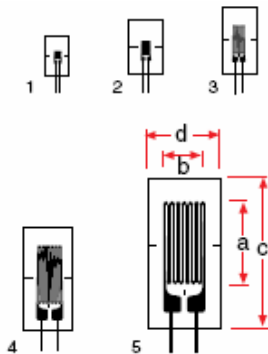


Figura 10. Dimensiones de las galgas

#### 7.4 Balanza tipo L

Esta balanza es un diseño tal que se puede situar las galgas sin ningún problema de deteriorarse,, además su forma aerodinámica no perjudica a la hora de toma de datos cabe aclarar que el diseño de la balanza mostrada en la figura 11 fue realizado por los Sub Tenientes de la Fuerza Aérea Julian Viveros Castillo y José Arias Gómez .



Figura 11. Balanza tipo L para Medición de Fuerzas y Momentos dentro del Túnel de Viento

#### 7.5 Procesamiento y visualización de la información

Para poder tener el procesamiento de cada una de las señales de las galgas se tendrán módulos DMD-465, se utilizarán 1 de estos ya que cada uno alcanza para 6 galgas.



Figura 12. Módulo para toma de datos de las galgas

Este modulo no solo son para galgas extensiométricas si no también para celdas de cargas y transductores, su función principal es la de instrumentar y amplificar la señal de salida para la toma de datos.

Tiene un Puente de excitación de 4 a 15Vdc que trabaja a 120mA con una resistencia de 120 Ohm en adelante, su ganancia y offset son ajustables

La adquisición de datos se dará por medio de una DAQ (Tarjeta de Adquisición de Datos) PDM-1208LS y para el procesamiento, la visualización de la información interfaz maquina – hombre y el controlador de las señales tanto de la posición como el de las galgas se hace por medio de un PC con software elaborado en Matlab.

## 9. DISEÑO ARQUITECTURAL

### 9.1 Documentación mecánica

La documentación mecánica de la máquina de simulación consta de dos etapas; planos



de partes propias del sistema y lista de partes.

#### *9.1.1 Planos de partes propias*

Para la elaboración de las partes de este diseño se tuvo en cuenta las fuerzas externas que se ejercen sobre el sistema (Fuerza del aire como el peso del aeromodelo y la estructura), también se tuvo en cuenta el comportamiento, peso, forma y tamaño de los motores para sus respectivos soporte por que estos en si, forman parte la estructura del diseño total. Un ejemplo es el diseño de parte propias son los ejes, que se realizo tomando cada parte del sistema como la balanza, los soportes de la balanza y motores como cubos, esto para facilitar los cálculos para hallar el diámetro necesario para soportar los movimientos y cada una de las estructuras, además de las fuerzas que interactúan sobre ello, estos cálculos se llevan acabo con sus respectivos diagramas de cuerpos libres, tomando estos eje a flexión y torsión, como columna o viga; en total se tuvieron que diseñar dos ejes, ya que cada uno va acoplado a los motores, el calculo de estos dieron que tienen que ser mayores a 1cm trabajando con un acero 1040 Maquinado estirado en frío.

### *9.2 Funcionalidad y medidas de las partes*

#### *9.2.1 Balanza y soporte:*

La balanza es un diseño tal de que soporte grandes cargas y facilite la toma de datos del viento como las diferentes fuerzas de sustentación y elevación, el vástago mide 35Cm de largo y 3.5Cm de espesor y el soporte del vástago mide 4Cm ancho, 10Cm de largo y 1.5Cm de espesor esta balanza esta hecha de aluminio. Figura 56 (parte 11)

#### *9.2.2 Soportes de motores.*

Es la encargadas de dar cuerpo al modelo y sujetar lo motores, balanzas, sensores, teniendo en cuenta la forma y medidas de estos, además también que no obstruyeran ningún movimiento, toma de datos de los elemento ya mencionados. Figura 56 (partes 2 y 4)

### *9.3 Documentación electrónica*

Este sistema va a estar alimentado por dos fuentes una dual a -12 y 12 voltios para los sensores, galgas, módulos, drivers y la otra fuente es una ATX 550 vatios de alto amperaje para los motores.

Se utilizaron dos fuentes por que los motores generan ruidos o sobre impulsos de corriente los cuales al conectar todos los implementos electrónicos de una misma fuente puede causar perdida de toma de datos, que dañen o descuadren los instrumentos.

#### *9.3.1 Tipo de Alimentación:*

- **Sensores:** Los enconder absolutos posee una alimentación de 5,5 voltios. Y su salida es lineal a la posición
- **Actuadores:** Se alimentan con 24 voltios y la corriente es lineal al tórque como se muestra en las figura 21 y 23. curva característica
- **Galgas:** Cada una de estas se alimenta con 10 voltios y salida en milivoltios de aquí se tiene que utilizar los módulos.
- **Módulos:** Se alimenta de 5 – 15 voltios y consumo de energía es de 120mA.

- **Driver:** Los elementos utilizados tienen un consumo de 5 y 12 voltios.

### 9.3.2 Elementos utilizados en los drivers:

- 4 Mosfet tipo N (IRF 9530)
- 4 Mosfet tipo P (IRF 540)
- Resistencias 10K, 1k
- 8 Diodos (1N4001)
- Optoacoplador (NPN)

## 9.4 Software de Control

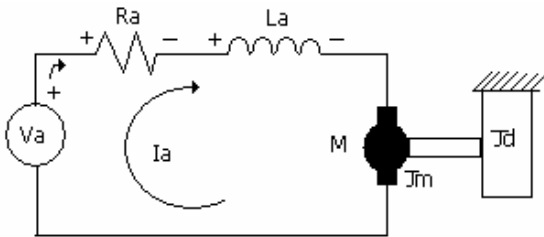


Figura 13. Sistema electromecánico del Motor

Como todo es una etapa de diseño, se procedió a simular el comportamiento de cada uno de los motores que interactúan en este sistema, teniendo en cuenta el data sheet de cada uno, se procedió a hallar la función de transferencia y sus respectivo comportamiento.

Teniendo en cuenta las características del Motor 1 su función de transferencia es:

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{3,43}{7,47 \times 10^{-4} s^3 + 0,160 s^2 + 3,02 s} \quad \text{Ec (4)}$$

Con la función de Transferencia del motor 1 se muestra el comportamiento en lazo abierto en la figura 23.

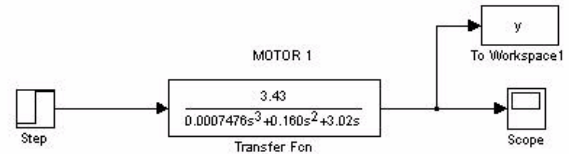


Figura 14. Función de Transferencia en Lazo Abierto del Motor 1

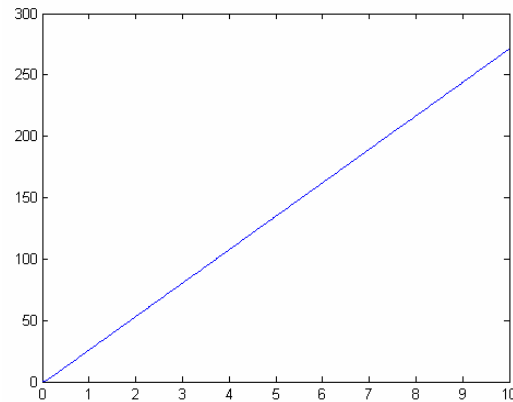


Figura 15. Comportamiento en lazo abierto del Motor 1.

La función de transferencia tiene un comportamiento inestable a lazo abierto como se muestra en la figura 15, lacerar el lazo de control, esta se estabiliza perfectamente y además sin error de estado estacionario pero con un tiempo de estabilización ineficiente.

Por esta razón se cree conveniente realizar un controlador de realimentación de estados, el cual va a permitir gracias a su diseño disminuir el tiempo de estabilización y controlar cada uno de los polos de la planta:

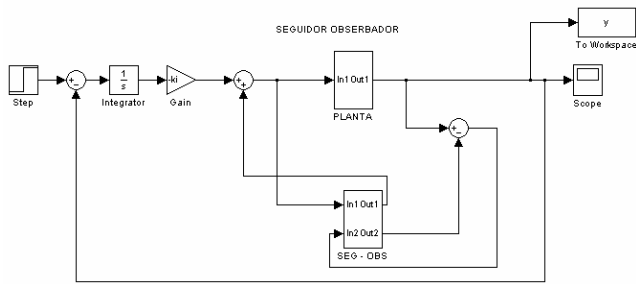


Figura 16. Diagrama de Bloques del Controlador Diseñado (Seguidor - Observador)

Gracias al controlador se obtiene un comportamiento como el que se muestra en la figura 25.

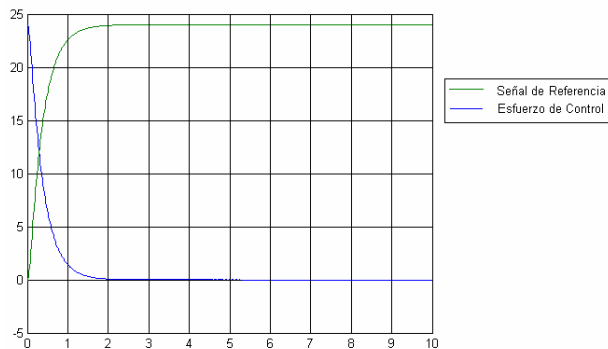


Figura 17. Comportamiento del Motor 1 después de Implementar el Controlador.

Para analizar el comportamiento del Motor 2 se procede de la misma manera que se analizó el primer Motor.

$$\frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{0,83}{1,68 \cdot 10^{-6} s^3 + 1,57 \cdot 10^{-3} s^2 + 0,0955 s} \quad \text{Ec (5)}$$

Teniendo la función de transferencia con los datos reales del motor se procede al respectivo diseño del controlador:

Primero se hace el análisis de la planta en lazo abierto y se obtiene un comportamiento similar al del Motor 1

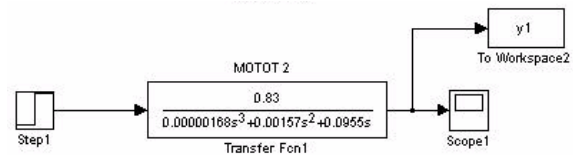


Figura 18. Función de Transferencia en Lazo Abierto del Motor 2.

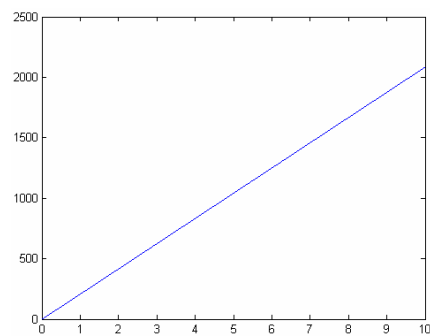


Figura 19. Comportamiento en lazo abierto del motor 2.

Cerrando el lazo de Control en la Función de Transferencia del Motor 2 se obtiene un comportamiento ideal, sin error de estado estacionario y con un buen tiempo de estabilización de alrededor de 1 segundo

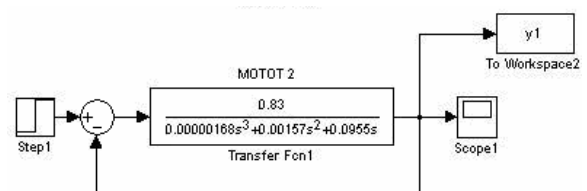


Figura 20. Función de Transferencia en Lazo Cerrado del Motor 2

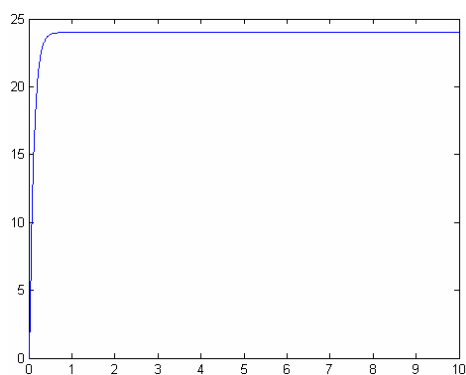


Figura 21. Comportamiento en lazo cerrado del motor 2.

Realizando el mismo tipo de controlador que para el Motor 1 (Seguidor - Observador), se observa que no hay gran diferencia con el comportamiento de la planta (Motor 2) en Lazo Cerrado como se muestra en la figura 20.

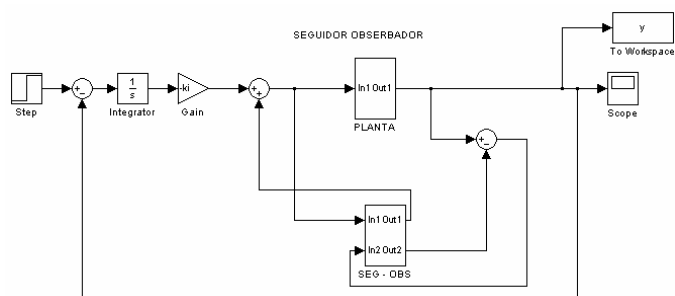


Figura 22. Diagrama de Bloques del Controlador para el Motor 2.

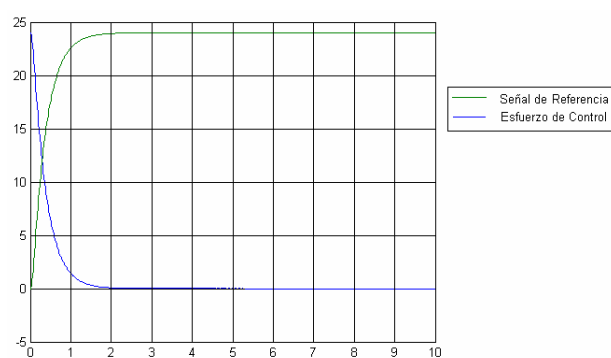


Figura 23. Comportamiento del Motor 2 después de Implementar el Controlador.

### Lista de partes

Esta parte del diseño consta de una imagen explosionada del diseño general de la máquina donde se enumeran y se les da un código a cada una de las piezas que conforman la máquina.

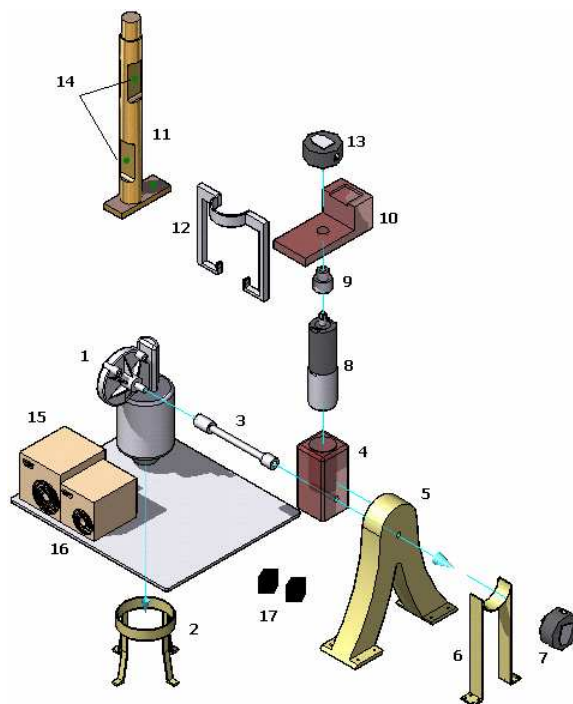


Figura 24. Vista explosionada

**Tabla 1. Lista de Partes del Dispositivo**

ITEM	PIEZA	DESCRIPCION
1	Motor 1	Motorreductor Marca Valeo serie 402826
2	Soporte de motor 1	Pieza Propia
3	Eje del motor 1	Diseño Propio
4	Soporte de motor 2	Pieza Propia
5	Soporte de eje Principal	Diseño Propio
6	Soporte de Encoder 1	Pieza Propia
7	Encoder 1	Sensor de posición Inteligente A2 USDigital
8	Motor 2	Motorreductor Marca Valeo serie 404722
9	Eje de Motor 2	Diseño Propio
10	Soporte guía Balanza	Pieza Propia
11	Balanza Aerodinámica	Pieza Propia
12	Encoder 2	Sensor de posición Inteligente A2 USDigital
13	Galgas Extensiométricas	Galgas Unidireccionales 120 Ohms SG-6/120 LY13
14	Fuente de los Motores	Fuente 24 VDC Alto Amperaje
15	Fuente de sistemas electrónicos	Fuente Dual Sencilla 12V y -12V
16	Módulos Para la Instrumentación de la Galgas	DMD-465 Amplificación e Instrumentación para 6 galgas

## 10. RECOMENDACIONES

- El tiempo dedicado a esta pasantía en el Centro de Investigaciones CITA ubicada en la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez, se realizó un estudio detallado sobre diferentes tecnologías de posicionamiento de balanzas aerodinámicas alrededor del mundo, todo esto con el fin de desarrollar un producto funcional y sencillo, se espera futuras adecuaciones como el control para mas grados de libertad para mejores pruebas tanto de despegue, aterrizaje y maniobras en el aire, ya que este diseño es de forma modular, además de ser acoplable cada unas de sus partes hace de este diseño mas sencillo.
- Como este diseño va dentro de un túnel de viento que consta con un motor trifásico y un variador de velocidad que proporciona el viento a diferentes velocidades, es recomendable controlar estos y el sistema de posicionamiento de la balanza aerodinámica, desde la misma consola de mandos, para evitar la

perdida de datos y hacer el trabajo del operario mas útil.

- En la etapa de control de los motorreductores escogidos para este diseño, serían de gran importancia para la construcción de todo el sistema para ver el comportamiento real mediante matlab, para un mejor control y mirar complicaciones futuras en el diseño real.

## CONCLUSIONES

- Gracias a las diferentes etapas de diseño, hace que un producto sea de mejor calidad y además ser competitivo ante una sociedad que esta en continuo cambio tecnológico gracias a métodos convencionales como el QFD.
- De acuerdo a pasos seguidos, con los conocimientos adquiridos por medio de la carrera ingeniería Mecatrónica se cumplió con los objetivos, las necesidades y las restricciones propuestas por medio de Centro de Investigaciones CITA de la escuela militar de aviación.
- Con la planeación realizada se identifica plenamente que tipo de dispositivo se requiere, y sabiendo claramente cuál es el problema podemos proceder a dar soluciones que satisfagan óptimamente las necesidades planteadas.
- Por medio de conceptos generados, prototipos ya realizados, tecnología aplicada a estos se probaron los conceptos por medio de métodos estructurados y no estructurados para la

selección y diversas combinaciones para la implementación y documentación adecuada dentro del proceso de diseño y creación de nuevos productos.

- El diseño final cumple con todos los parámetros propuestos al inicio, ya que sus mecanismos fueron diseñados por medio de normas tales que permiten hacer cualquier tipo de generación de ideas viable o no viable para un diseño óptimo y funcional.
- La visualización de variables, se va a llevar a cabo en tiempo real en cualquier posición deseada por el usuario, ya que de aquí parte el estudio de los aeromodelos tanto a fuerzas como de momentos a diferentes velocidades del viento.
- Esta idea del sistema de posicionamiento de una balanza aerodinámica en un túnel de viento subsónico, es muy buena, ya que de este estudio parten para la construcción de diferentes prototipos de aviones reales, respectivos materiales y diferentes formas aerodinámicas de partes de ellos.

## REFERENCIAS

### Paginas Web

Historia, Misión, Visión de la Empresa  
[1] [www.emavi.edu.co](http://www.emavi.edu.co).

Balanzas Aerodinámicas Existentes  
[2] [www.inicia.es/de/vuelo/PBV/PBV12.html](http://www.inicia.es/de/vuelo/PBV/PBV12.html)

Balanza Aerodinámica Utilizada en la NASA

[3] [http://ar.geocities.com/wwwsanchez/apendice\\_a.htm](http://ar.geocities.com/wwwsanchez/apendice_a.htm)  
Túnel de Viento

[4] [www.iaa.edu.ar/Investigacion/tunel/espanol/mswt.htm](http://www.iaa.edu.ar/Investigacion/tunel/espanol/mswt.htm).

Balanzas Aerodinámicas

[5] [www.aerolab.com](http://www.aerolab.com)

Túnel de Viento

[6] [www.iaa.edu.ar/Investigacion/tunel/espanol/mswt.htm](http://www.iaa.edu.ar/Investigacion/tunel/espanol/mswt.htm)

Motorreductores

[7] [www.valeo-swf-motoren.de/html/showmotor.php?id\\_artikel=1861&id\\_sprache=2](http://www.valeo-swf-motoren.de/html/showmotor.php?id_artikel=1861&id_sprache=2)

Motorreductores

[8] [www.valeo-swf-motoren.de](http://www.valeo-swf-motoren.de)

Sensores de Posición

[9] [www.eltra.it/catalog/cat\\_list.asp?LANG=SPA&CAT=ENCASS&SHOWPG=enc\\_ass0\\_SPA.htm](http://www.eltra.it/catalog/cat_list.asp?LANG=SPA&CAT=ENCASS&SHOWPG=enc_ass0_SPA.htm)

Sensores de Posición

[10] [www.vishay.com/docs/57000/6011045.pdf](http://www.vishay.com/docs/57000/6011045.pdf)

Galgas Extensiométricas

[11] [www.omega.com/Pressure/pdf/gen\\_purpose\\_strain\\_SG.pdf](http://www.omega.com/Pressure/pdf/gen_purpose_strain_SG.pdf)

Modulo de Instrumentación

[12] [www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=DM D--465&Nav=prec04](http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=DM D--465&Nav=prec04)

## **Libros**

Norton, Robert. Diseño de Maquinas.  
Primera Edición. Prentice Hall

Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de Control  
Moderna, Prentice Hall, 2001

Otto, K. Products Designs. Techniques in  
Reverse Engineering and New Product  
Development Prentice Hall, 2001

Ulrich, Karl and Sppinder, Steven. Product  
Design and Development. Second Edition,  
Mc. Graw Hill, United States of America,  
2000.

Shames, Irving H. Mecánica de Fluidos.  
Santa Fe de Bogotá Mc Graw-Hill 1995.

Franklin, Gene F. Control de Sistemas  
Dinámicos con Retroalimentación Reading.  
Massachusetts Addison-Wesley 1991

Ogata, Katsuhiko. Dinámica de Sistemas  
México Prentice-Hall 1987

Daily, James W. Dinámica de los Fluidos  
Con aplicaciones en la Ingeniería México  
Trillas 1969.